



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
**ΑΥΤΟΝΟΜΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ
ΩΣΜΩΣΗ ΓΙΑ ΞΕΝΟΔΟΧΙΑΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ**

υπό

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΠΡΙΝΟΥ



Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
**ΑΥΤΟΝΟΜΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ
ΩΣΜΩΣΗ ΓΙΑ ΞΕΝΟΔΟΧΙΑΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ**

υπό

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΠΡΙΝΟΥ



Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

© 2021 Κωνσταντίνος Πρίνος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ .Νικόλαος Ανδρίτσος Καθηγητής στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο γνωστικό αντικείμενο «Πειραματικά Φαινόμενα Μεταφοράς».
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Βασίλης Μποντόζογλου Καθηγητής, στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο γνωστικό αντικείμενο «Φαινόμενα Μεταφοράς – Συσκευές Φυσικών Διεργασιών».
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης Καθηγητής, Καθηγητής στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο γνωστικό αντικείμενο «Υπολογιστική Ρευστομηχανική».

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ανδρίτσο Νικόλαο που συνεργάστηκε μαζί μου για να ολοκληρώσω την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και την εταιρεία SYCHEM A.E που μου παρείχε πληροφορίες, δεδομένα για το έργο που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία αλλά και αρκετή βοήθεια στην κατανόηση του αντικειμένου της αφαλάτωσης.

στον πατέρα μου,
τον επαγγελματία-επιστήμονα
και πάνω από όλα αγωνιστή και άνθρωπο,
Απόστολο Πρίνο

ΑΥΤΝΟΜΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ ΓΙΑ ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΡΙΝΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος,
Καθηγητής Φαινομένων Μεταφοράς

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βιβλιογραφική έρευνα της διεργασίας της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, ως αντιπαράδειγμα παραγωγής πόσιμου νερού σε περιπτώσεις όπου κρίνεται συμφέρον ή και αναγκαίο. Στην εργασία καταγράφεται το παγκόσμιο πρόβλημα της άμεσης διαθεσιμότητας καθαρού-πόσιμου νερού στον πληθυσμό και αναδεικνύεται η μέθοδος της αφαλάτωσης ως η κυρίαρχη εναλλακτική λύση του προβλήματος αυτού. Επιπλέον αναφέρονται και όλες οι υπόλοιπες μέθοδοι αφαλάτωσης που έχουν αναπτυχθεί ανά τα χρόνια.

Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η μέθοδος της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση που αποτελεί την ανερχόμενη-κυρίαρχη μέθοδο, ειδικά σε εγκαταστάσεις που απαιτούν μικρή παραγωγή πόσιμου νερού ανά ημέρα. Επίσης καταγράφονται τα βασικά στάδια της μεθόδου, οι τύποι των μεμβρανών που υπάρχουν – χρησιμοποιούνται, οι βασικές αρχές μελέτης και σχεδιασμού μιας μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργίας της (φαινόμενο fouling, διαβρώσεις κλπ).

Τέλος παρουσιάζεται η εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στο ξενοδοχειακό συγκρότημα Marbella Elix, η μέθοδος με την οποία μελετήθηκε και εγκαταστάθηκε, από την εταιρεία SYCHEM S.A. καθώς και οι συνθήκες στις οποίες λειτουργεί.

STAND ALONE REVERSE OSMOSIS DESALINATION PLANTS FOR HOTEL ESTABLISHMENTS

KONSTANTINOS PRINOS

Department of Mechanical Engineering and Industry, University of Thessaly, 2021

**Supervisor: Dr Nikolaos Andritsos
Professor of Transport Phenomena**

The purpose of this thesis is the bibliographic research of the process of desalination with reverse osmosis, as a counterfactual of drinking water production in cases where it is considered advantageous or necessary. The project records the global problem of the immediate availability of clean-drinking water to the population and highlights the method of desalination as the dominant alternative to this problem. In addition, all other desalination methods that have been developed over the years are mentioned.

More specifically, the method of desalination with reverse osmosis, which is the ascending-dominant method, is analyzed, especially in facilities that require a small production of drinking water per day. Also recorded are the basic stages of the method, the types of membranes that exist – used, the basic principles of study and design of a desalination plant with reverse osmosis, the problems that occur during its operation (fouling effect, erosions, etc.).

Finally, the installation of a reverse osmosis desalination plant in the Hotel Complex Marbella Elix is presented, the method by which it was studied and installed by the company SYCHEM S.A. as well as the conditions in which it works.\n

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Γενικά - το πρόβλημα των υδάτινων πόρων	1
1.1 Η σημασία του νερού στην ανάπτυξη των πολιτισμών	1
1.2 Το πρόβλημα της λειψυδρίας σε παγκόσμιο επίπεδο και στην Ελλάδα	1
1.3 Αφαλάτωση μια πρώτη προσέγγιση	3
1.4 Μέθοδοι Αφαλάτωσης νερού	5
1.4.1. Μέθοδοι Θερμικών Διεργασιών	5
1.4.1.1 Πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation MED)	5
1.4.1.2. Πολυβάθμια εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF)	7
1.4.1.3 Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression)	7
1.4.1.4 Ηλιακή εξάτμιση (Solar distillation)	8
1.4.2 Μέθοδοι Μεμβρανών	9
1.4.2.1. Αντίστροφη Ώσμωση (RO)	9
1.4.2.2. Ηλεκτροδιάλυση (ED)	10
1.4.3 Επιλογή Μεθόδου Αφαλάτωσης	11
1.4.3.1 Σύγκριση μεθόδων Αφαλάτωσης	12
1.4.3.2. Πλεονεκτήματα Αντίστροφης Ώσμωσης	12
1.4.4. Εγκαταστάσεις μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση σε διεθνή και εγχώριο επίπεδο.	14
1.4.4.1. Κόστος αφαλατωμένου νερού σε χώρες με ευρεία εφαρμογή της μεθόδου ..	15
1.4.4.2. Η εξέλιξη της αφαλάτωσης στην Ελλάδα ανά τα έτη	16
1.4.5 Θεσμικό πλαίσιο	17
1.4.5.1. Θεσμικό πλαίσιο για την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης	17
1.4.5.2. Νομοθετικό πλαίσιο για την απόρριψη της άλμης	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Ανάλυση σύγχρονων μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση	21
2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου	21
2.1.1 Στάδια και διάγραμμα Ροής	21
2.2 Τροφοδοσία – Άντληση	22
2.1.1 Τεχνικές Αναρρόφησης Ακατέργαστου Νερού	22
2.2.2. Σύγκριση Τεχνικών Αναρρόφησης	25
2.3 Προκατεργασία	26
2.3.1 Τεχνικές Προκατεργασίας Ακατέργαστου Νερού	26
2.4 Κύρια Διεργασία	31
2.4.1 Μεμβράνες Αντίστροφης ώσμωσης	31

2.4.1.1. Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (<i>Hollow fiber membrane modules</i>)	33
2.4.1.2. Στοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης ή σπειροειδούς διαμόρφωσης (<i>Spiral wound membrane modules</i>)	34
2.5 Μαθηματικά μοντέλα συμπεριφορές επιπέδων μεμβρανών.....	35
2.5.1 Μοντέλο επιλεκτικής απορρόφησης τριχοειδούς ροής	36
2.5.2 Μοντέλο θερμοδυναμικής μη αντιστρεπτών διεργασιών	37
2.5.3 Μοντέλο διάλυσης – διάχυσης	38
2.5.4 Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης.....	40
2.5.5 Μαθηματική ανάλυση μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης.....	43
2.6 Αντλητικά Συγκροτήματα – Συστήματα Ανάκτησης Ενέργειας.....	45
2.6.1 Γενικά – Ορισμός	45
2.6.2 Υλικά Κατασκευής	46
2.6.3 Τύπο Αντλιών.....	46
2.6.3.1 Δυναμικές Αντλίες	48
2.6.3.1.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Δυναμικών αντλιών	49
2.6.3.1.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Δυναμικών αντλιών.....	50
2.6.3.1.3 Φυγόκεντρες Αντλίες.....	51
2.6.3.1 Περιστροφικές αντλίες θετικής εκτόπισης.....	51
2.6.4 Ηλεκτροκινητήρες Αντλιών	52
2.6.5 Συστήματα Ανάκτησης Ενέργειας	53
2.6.5.1. Εναλλάκτης Πίεσης (<i>Pressure Exchanger</i>)	57
2.7 Υδραυλικά κυκλώματα – Όργανα μέτρησης.....	60
2.7.1 Σωληνώσεις – Εξαρτήματα Σύνδεσης	60
2.7.2. Όργανα Μέτρησης.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Βασικοί παράμετροι σχεδιασμού μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη	
ώσμωση	63
3.1 Ποιότητας ακατέργαστου Νερού (Νερό τροφοδοσίας της μονάδας)	63
3.1.1 Υφάλμυρο Νερό	66
3.1.2 Θαλασσινό νερό	67
3.2 Παράμετροι λειτουργίας συστήματος αντίστροφης ώσμωσης.....	68
3.3 Διατάξεις μεμβρανών σε συστήματα με αντίστροφη ώσμωση.....	69
3.4 Διαδικασία σχεδιασμού συστήματος με αντίστροφη ώσμωση	72
3.5 Κανονικοποίηση λειτουργικών παραμέτρων μεμβρανών.....	73
3.6 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην διεργασία της αφαλάτωσης.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Αντιμετώπιση λειτουργικών προβλημάτων.....	77
4.1 Μείωση της απόδοσης των μεμβρανών	77
4.1.1 Το φαινόμενο της έμφραξης (fouling) των μεμβρανών στην αντίστροφη ώσμωση	78
4.1.2 Μέτρα πρόληψης κατά του φαινομένου της έμφραξης των μεμβρανών - Χημικοί καθαρισμοί.....	82
4.2 Διαβρώσεις μεταλλικών μερών	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Το παράδειγμα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix (150 m³/day)	86
5.1 Στόχοι Σχεδιασμού	86
5.2 Τεχνική Περιγραφή.....	86
5.2.1 Ενεργειακός Σχεδιασμός	86
5.2.2 Περιγραφή μονάδας αφαλάτωσης (SWRO).....	88
5.2.2.1 Εγκατεστημένος Εξοπλισμός	93
5.2.3 Συμπεριφορά – Απόδοση μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης.....	111
5.3 Εποπτική παρακολούθηση μονάδας.....	114
5.4 Διαδικασία συντήρησης.....	120
5.5 Παρατηρήσεις και πιθανές βελτιωτικές προτάσεις για την μονάδα αφαλάτωσης....	122
Συμπεράσματα	123
Βιβλιογραφία	125

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-1 Συγκεντρωτική ετήσια δαπάνη μεταφερόμενων ποσοτήτων νερού στις Ν.Α Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα	2
Πίνακας 1-2 Προδιαγραφές για το πόσιμο νερό από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας	5
Πίνακας 1-3 Πίνακας Σύγκρισης Μεθόδων Αφαλάτωσης	12
Πίνακας 1-4 Πίνακας καταγραφής παραγωγής αφαλατωμένου νερού σε παγκόσμιο επίπεδο	14
Πίνακας 1-5 Πίνακας με τις δέκα μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως	14
Πίνακας 1-6 Οι δέκα μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα.	16
Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση τετραπολικών κινητήρων βάση της αποδοτικότητας τους ανάλογα της ισχύος τους.....	52
Πίνακας 3-1 Πίνακας ταξινόμησης φυσικών νερών βάση της αλατότητας τους	65
Πίνακας 3-2 Παραδείγματα σύστασης υφάλμυρου νερού (Dumont).....	66
Πίνακας 3-3 Ανόργανη σύνθεση θαλασσινού νερού για διάφορες αλατότητες	67
Πίνακας 3-4 Αλατότητα και αγωγιμότητα θαλασσινού νερού για διάφορες περιοχές	68
Πίνακας 3-5 Εξισώσεις σχεδιασμού συστήματος RO	74
Πίνακας 3-6 Ορισμοί Συμβόλων Εξισώσεων Σχεδιασμού	75

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1-1 Κυβικά νερού που μεταφέρθηκαν στα νησιά του Αιγαίου κατά το έτος 2007	3
Εικόνα 1-2 Σχηματική απεικόνιση πολυβάθμιας εξάτμισης.....	6
Εικόνα 1-3 Σχηματική απεικόνιση πολυβάθμιας εκτόνωσης.	7
Εικόνα 1-4 Σχηματική απεικόνιση εξάτμισης με συμπίεση ατμών.....	8
Εικόνα 1-5 Σχηματική απεικόνιση ηλιακής εξάτμισης.....	9
Εικόνα 1-6 Σχηματική απεικόνιση αντίστροφης ώσμωσης.	10
Εικόνα 1-7 Σχηματική απεικόνιση Ηλεκτροδιάλυσης.	11
Εικόνα 1-8 Εγκατάσταση μονάδας RO σε container στα χυτά Τρικάλων	13
Εικόνα 1-9 Εργοστάσιο αφαλάτωσης θαλασσινού νερού στο Περθ της Αυστραλίας.....	16
Εικόνα 2-1 Τοποθέτηση οριζόντιου διάτρητου σωλήνα αναρρόφησης.....	25
Εικόνα 2-2 P&ID διεργασίας αφαλάτωσης (RO) με ανάκτηση ενέργειας	27
Εικόνα 2-3 Πολυστρωματικά φίλτρα ταχείας διήθησης.....	29
Εικόνα 2-4 Μεμβράνες κοίλων ινών (Tubular fiber membrane modules)	34
Εικόνα 2-5 Στοιχείο μεμβράνης ελικοειδούς περιέλιξης (spiral wound membrane module)	35
Εικόνα 2-6 Δυναμικές αντλίες : (α) φυγόκεντρα, (β) μικτής ροής, (γ) αξονικής ροής, (δ) στροβιλαντλία	48
Εικόνα 2-7 Διάγραμμα Ροής διάταξης ανάκτησης ενέργειας τύπου Αντίστροφης Υδραυλικής Αντλίας.	55
Εικόνα 2-8 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας τύπου Pelton Wheel	56
Εικόνα 2-9 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας τύπου Hydraulic Turbo Booster	56
Εικόνα 2-10 P&ID Reversis Osmosis plant with Pressure Exchanger	57
Εικόνα 2-11 Απλοποιημένη διάταξη τύπου Εναλλάκτη Πίεσης.....	57
Εικόνα 2-12 Pressure Exchanger – Exploded view	60
Εικόνα 3-1 Ταξινόμηση νερών βάση της αλατότητας τους και του οργανικού της φορτίου (TOC = total organic carbon)	65
Εικόνα 4-1 Μηχανισμοί έμφραξης (fouling) των μεμβρανών.....	81
Εικόνα 4-2 Απεικόνιση από SEM μεμβρανών (α) στην αρχή της λειτουργίας τους, (b) φραγμένες, (c)μετά από καθαρισμό με συγκεκριμένο πολυμερές, (d)φραγμένες και (e) μετά από καθαρισμό με διαφορετικό πολυμερές	82
Εικόνα 4-3 Σχηματική απεικόνιση καθαρισμού μεμβράνης η οποία έχει υποστεί οργανική έμφραξη	84
Εικόνα 4-4 Το φαινόμενο της σπηλαιώσης σε μια φυγόκεντρική αντλία	85
Εικόνα 5-1 Σχηματική απεικόνιση αντλίας τροφοδοσίας.....	94
Εικόνα 5-2 Τεχνικά στοιχεία αντλίας τροφοδοσίας	94
Εικόνα 5-3 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας αντλίας τροφοδοσίας.....	95
Εικόνα 5-4 Φίλτρο άμμου από την μονάδα αφαλάτωσης στο Marbella Elix	96
Εικόνα 5-5 Απεικόνιση δοσομετρικής αντλίας αντικαθαλωτικού	96
Εικόνα 5-6 Τεχνικές Προδιαγραφές αντλίας δοσομέτρησης αντικαθαλωτικού	97
Εικόνα 5-7 Καμπύλη λειτουργίας αντλίας δοσομέτρησης αντικαθαλωτικού	97
Εικόνα 5-8 Σακόφιλτρο Eaton	98
Εικόνα 5-9 Αντλία υψηλής πίεσης Danfoss APP 8.2	99
Εικόνα 5-10 Διάγραμμα παροχής – στροφών αντλίας υψηλής πίεσης.....	100

Εικόνα 5-11 Φωτογραφική απεικόνιση εναλλάκτη πίεσης	101
Εικόνα 5-12 Πίνακας λειτουργίας και απόδοσης εναλλάκτη πίεσης.....	102
Εικόνα 5-13 Αντλία ανακυκλοφορίας	102
Εικόνα 5-14 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας ανακυκλοφορίας.....	103
Εικόνα 5-15 Καμπύλες λειτουργίας αντλίας ανακυκλοφορίας	104
Εικόνα 5-16 Δοχεία πίεσης – Έξοδος αφαλατωμένου νερού	105
Εικόνα 5-17 Τεχνικά χαρακτηριστικά μεμβρανών	106
Εικόνα 5-18 Διαστάσεις και όρια λειτουργίας των μεμβρανών	106
Εικόνα 5-19 Φίλτρο δολομίτη – Poltank Das 43419	107
Εικόνα 5-20 Δοσομετρικές αντλίες αντικαθαλωτικού νερού και χλωρίου στην μονάδα αφαλάτωσης.....	108
Εικόνα 5-21 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας χλωρίωσης	108
Εικόνα 5-22 Αντλία χημικού καθαρισμού - CM 25-3G.....	109
Εικόνα 5-23 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας χημικού καθαρισμό.....	110
Εικόνα 5-24 Καμπύλες λειτουργίας αντλίας χημικού καθαρισμού	110
Εικόνα 5-25 ROSA 9.1 Υπολογιστικό φύλλο 1	112
Εικόνα 5-26 Υπολογιστικό φύλλο 2 – ROSA 9.1	113
Εικόνα 5-27 Υπολογισμοί παραγόντων που επηρεάζουν την έμφραξη των μεμβρανών	114
Εικόνα 5-28 Περιβάλλον εργασίας (HMI) μονάδας αφαλάτωσης.....	114
Εικόνα 5-29 Calibration Settings – Page 1	115
Εικόνα 5-30 Calibration Settings – Page 2.....	115
Εικόνα 5-31 General Settings Menu.....	116
Εικόνα 5-32 Alarm Settings Menu	116
Εικόνα 5-33 Διάγραμμα μεταβολής της πίεσης με τον χρόνο	119
Εικόνα 5-34 Διάγραμμα μεταβολής της ογκομετρικής παροχής αφαλατωμένου νερού και αλμόλοιπου με τον χρόνο	119
Εικόνα 5-35 Διάγραμμα μεταβολής της αλατότητας του αφαλατωμένου νερού με τον χρόνο	120

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1-1 Συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης από το έτος 1945	4
Σχήμα 1-2 Δυναμικότητα των νέων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης ανά έτος από το 1945 – 2004	4
Σχήμα 2-1 Απλοποιημένο Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αφαλάτωσης με RO	21
Σχήμα 2-2 Κάθετο πηγάδι αναρρόφησης	23
Σχήμα 2-3 Οριζόντιο πηγάδι αναρρόφησης.....	24
Σχήμα 2-4 Πόλωση συγκέντρωσης με μεμβράνες RO	41
Σχήμα 2-5 Κατηγορίες αντλιών κυκλοφορίας [Παπαϊωάννου,2002]	47
Σχήμα 2-6 Εύρος λειτουργίας τύπων αντλιών [Παπαϊωάννου 2002].....	47
Σχήμα 2-7 Συγκριτικό διάγραμμα ανηγμένης ενεργειακής κατανάλωσης παραγόμενου νερού συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού σε σχέση με το ποσοστό ανάκτησης του.....	59
Σχήμα 3-1 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης συνεχούς ροής.....	70
Σχήμα 3-2 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης διακοπτόμενης ροής	70
Σχήμα 3-3 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης μιας μεμβρανοθήκης	71
Σχήμα 3-4 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης ενός σταδίου	71
Σχήμα 3-5 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης δύο σταδίων (λόγος σταδίων 2:1).....	72
Σχήμα 3-6 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης διπλού περάσματος	72
Σχήμα 3-7 Απόρριψη αλάτων και ροή νερού σε συνάρτηση της θερμοκρασίας	76
Σχήμα 4-1 Η επίδραση της αύξησης του SDI στην αντίσταση ροής.....	80
Σχήμα 5-1 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής (P&ID) της μονάδας αφαλάτωσης με RO στο Marbella Elix.	87
Σχήμα 5-2 Διάγραμμα ροής σταδίου προκατεργασίας.....	89
Σχήμα 5-3 Διάγραμμα Ροής κυρίου στάδιου της διεργασίας.....	91
Σχήμα 5-4 Διάγραμμα Ροής σταδίου μετα-επεξεργασίας	92
Σχήμα 5-5 Υπόμνημα συμβολισμού βασικού εξοπλισμού και εξαρτημάτων	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Γενικά - το πρόβλημα των υδάτινων πόρων

1.1 Η σημασία του νερού στην ανάπτυξη των πολιτισμών

Το νερό (ή κατά IUPAC ονομασία «(μονο) οξειδάνιο») θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία για την ανάπτυξη των πολιτισμών (τόσο των αρχαίων όσο και των σύγχρονων κοινωνιών).

Ο νεοελληνικός όρος νερό εμφανίζεται στο Βυζάντιο και προέρχεται από τον επιθετικό προσδιορισμό της βασικής αρχαιοελληνικής λέξης ύδωρ κατά παράλειψη νεαρόν ύδωρ δηλαδή φρέσκο νερό.

Η σημασία του νερού στην δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση του ανθρώπινου πολιτισμού είναι γνωστή και καταγεγραμμένη. Πολλοί από τους μεγάλους αρχαίους πολιτισμούς αναπτύχθηκαν σε περιοχές όπου το νερό ήταν άφθονο και εύκολα προσβάσιμο και διαθέσιμο όπως για παράδειγμα οι πολιτισμοί των Αιγυπτίων και των λαών της Μεσοποταμίας. Και στην εποχή μας όμως τόσο η αστική όσο και η βιομηχανική ανάπτυξη των χωρών βασίζονται στην εύκολη πρόσβαση στο νερό, είτε αυτό είναι πόσιμο είτε είναι θαλασσινό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι χώρες της Μεγάλης Βρετανίας και της Γερμανίας που λόγω της ανεπτυγμένης βιομηχανίας που διαθέτουν, το μεγαλύτερο ποσοστό διαθέσιμου νερού διοχετεύεται σε αυτόν τον τομέα.

1.2 Το πρόβλημα της λειψυδρίας σε παγκόσμιο επίπεδο και στην Ελλάδα

Είναι δεδομένο ότι το νερό αποτελεί, πέρα από αναγκαίο συστατικό για την ανάπτυξη των πολιτισμών, και το βασικότερο στοιχείο για την διατήρηση της ανθρώπινης ζωής. Παρόλο όμως αυτής της ιδιαίτερα σημαντικής ιδιότητας του το νερό στις μέρες μας έχει καταστεί δύσκολα προσβάσιμο για ένα σημαντικό κομμάτι του παγκόσμιου πληθυσμού. Ειδικότερα δε για την περίπτωση της Ελλάδας, σε πολλά νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου το πρόβλημα ικανοποίησης των αναγκών για πόσιμο νερό γίνεται ολοένα και μεγαλύτερο λόγω αφενός της αύξησης του τουρισμού και αφετέρου της αυξημένης ανομβρίας. Η μέχρι στιγμής λύση της πολιτείας σε αυτό το κομμάτι ήταν σε μεγάλο βαθμό η μεταφορά του πόσιμου νερού (ειδικότερα στα άνυδρα νησιά) με ιδιωτικά υδροφόρα πλοία ή με υδροφόρες του πολεμικού ναυτικού, ενώ οι τοπικές κοινωνίες προσπαθώντας να βρουν μια πιο μακροπρόθεσμη λύση, προσπάθησαν να καλύψουν τις ανάγκες τους με γεωτρήσεις, λιμνοθάλασσες ακόμα και με στέρνες – σε επίπεδο νοικοκυριού – που χρησιμοποιούνταν κυρίως για άρδευση. Όλα τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα το κόστος του πόσιμου νερού ανά κυβικό μέτρο να είναι αρκετά υψηλό. Επίσης ένα άλλο χαρακτηριστικό πρόβλημα που αναφέρεται από τους μελετητές των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, είναι ότι σε περίπτωση ανόδου της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στην Ελλάδα κατά 2 °C, θα επέλθει μείωση της τάξης του 2% στην εισροή υδάτων στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Σε περίπτωση ακόμα που

αυτή η άνοδος είναι μεγαλύτερη ως και το τέλος του αιώνα, αυτή η μείωση μπορεί να φτάσει και σε ποσοστά 10%.

Πίνακας 1-1 Συγκεντρωτική ετήσια δαπάνη μεταφερόμενων ποσοτήτων νερού στις Ν.Α Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

ΕΤΟΣ	Ν.Α. ΚΥΚΛΑΔΩΝ			Ν.Α. ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΟΥ		
	Ποσότητες κ.μ	Δαπάνες € (με ΦΠΑ)	Δαπ. ανά κ.μ.	Ποσότητες κ.μ	Δαπάνες € (με ΦΠΑ)	Δαπ. ανά κ.μ.
2002	329.343	2.561.278,36	7,78	617.745	3.109.358,65	5,03
2003	336.777	2.772.718,04	8,23	605.019	3.214.680,89	5,31
2004	338.812	2.787.235,66	8,23	759.737	4.034.203,29	5,31
2005	464.562	4.006.916,45	8,63	969.676	5.082.935,63	5,24
2006	567.719	4.677.686,54	8,24	1.005.338	4.905.044,06	4,88
2007	697.117	5.802.509,26	8,32	1.101.628	5.403.900,34	4,91
2008	687.731	5.721.921,92	8,32	1.141.724	5.765.706,20	5,05
2009	429.075	3.569.904,00	8,32	826.910	4.175.895,50	5,05
2010*	59.769	575.713,95	9,63	95.345	905.3169,14	9,49
ΣΥΝΟΛΑ	3.910.905	32.475.884		7.123.122	36.596.894	



Εικόνα 1-1 Κυβικά νερού που μεταφέρθηκαν στα νησιά του Αιγαίου κατά το έτος 2007

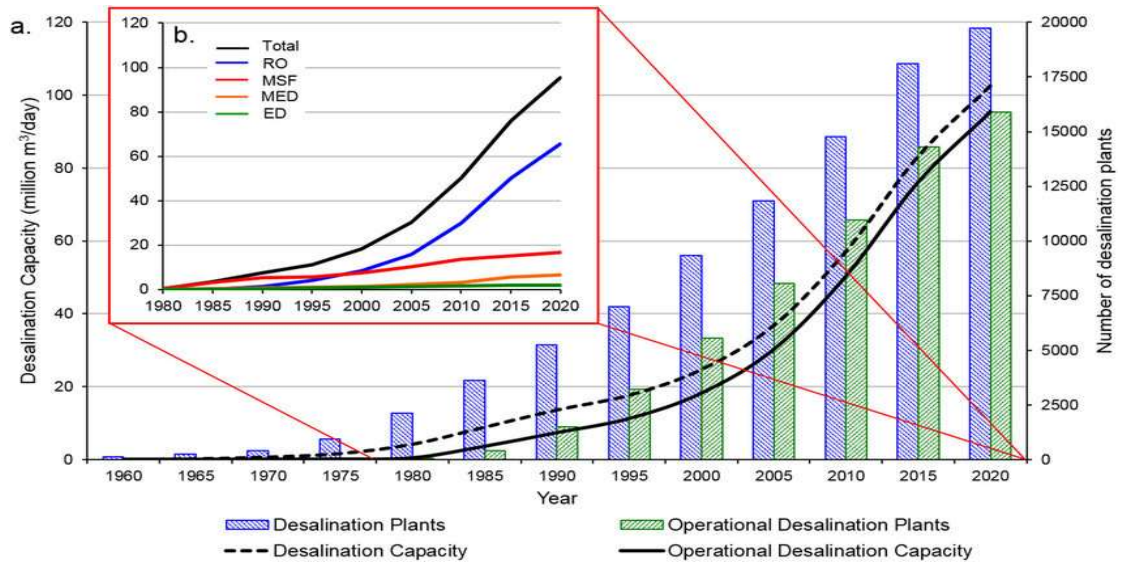
Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

1.3 Αφαλάτωση μια πρώτη προσέγγιση

Οι μέθοδοι επεξεργασίας νερού έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό τους την αφαίρεση όλων εκείνων των συστατικών που το καθιστούν γενικά μη εκμεταλλεύσιμο για συγκεκριμένη χρήση, με την βοήθεια φυσικών ή χημικών διεργασιών.

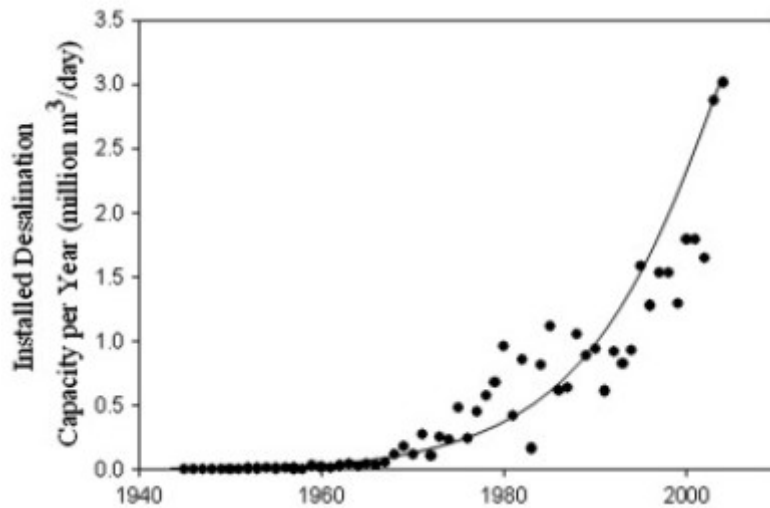
Οι διεργασίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στους υπάρχοντες υδάτινους πόρους όσο και στα αστικά ή και τα βιομηχανικά απόβλητα. Οι μέθοδοι της αφαλάτωσης ειδικότερα, έχουν ως στόχο την μείωση του ποσοστού αλάτων που περιέχονται στο νερό σε επίπεδο τέτοιο ώστε το νερό να είναι χημικά και μικροβιολογικά αποδεκτό προς την προδιαγραφόμενη χρήση. Η πιο συνήθης χρήση του αφαλατωμένου νερού είναι η κατανάλωση του ως πόσιμο, οι προδιαγραφές του οποίου τίθενται από την ισχύουσα νομοθεσία (πίνακας 1.1.). Η εξέλιξη της μεθόδου της αφαλάτωσης είναι ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες μιας και η διεργασία αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη ανά τον κόσμο. Ο βασικός στόχος της εξέλιξης αυτής είναι η μείωση του κόστους παραγωγής αφαλατωμένου νερού, καθώς όμως και η μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος της μεθόδου που αφορά κυρίως της απόρριψη εναπομείναντος αλμόλοιπου προς το περιβάλλον.

Η εξέλιξη λοιπόν αυτή μας έχει φέρει στο σημείο σήμερα να μετράμε πάνω από 15.000 μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως (ανεξαρτήτως μεθόδου), που παράγουν πάνω από 50 εκατομμύρια m³ πόσιμου νερού την ημέρα. Παρακάτω, όπως φαίνεται και από τα σχήματα 1.1. και 1.2., η ραγδαία αύξηση της δυναμικότητας των εγκαταστάσεων της αφαλάτωσης ξεκίνησε από το 1980 και μετά. Στα σχήματα περιλαμβάνονται όλες οι μονάδες αφαλάτωσης ανεξαρτήτως τεχνολογίας, καθώς από εργοστάσια που είναι εκτός λειτουργίας.



Σχήμα 1-1 Συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα αφαλάτωσης από το έτος 1945

Πηγή : Mapping RO-Water Desalination System Powered by Standalone PV System for the Optimum Pressure and Energy Saving , by Mathhar Bdour ,Zakariya Dalala ,Mohammad Al-Addous ,Atef Kharabsheh and Hadi Khzouz , Department of Energy Engineering, German Jordanian University, March 2020



Σχήμα 1-2 Δυναμικότητα των νέων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης ανά έτος από το 1945 – 2004.

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

Πίνακας 1-2 Προδιαγραφές για το πόσιμο νερό από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας

Πηγή : Δελγιάννης , Μπελεσιώτης Β, Μέθοδοι και συστήματα αφαλάτωσης αρχές διεργασιών, 1995

Συστατικά	Περιοριστικότητα εις mg/l	
	Ανώτατο δεκτό	Ανώτατο επιτρεπτό
Υλικά διαλυμένα άλατα TDS	500	1500
Χλωριούχα Cl	200	600
Θειικά SO ₄ ²⁻	200	400
Ασβέστιο Ca ²⁺	75	100
Μαγνήσιο Mg ²⁺	30	150
Φθοριούχα F ⁻	0.7	1.7
Νιτρικά NO ₃ ⁻	<50	100
Χαλκός Cu ²⁺	0.05	1.5
Σίδηρος Fe ³⁺	0.10	1.0
Υδρογόνο σε μονάδες	250	-
Χλωριούχο νάτριο NaCl	7.0 έως 8.5	6.5 έως 9.2
ρΗ		

1.4 Μέθοδοι Αφαλάτωσης νερού

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης νερού χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Στις θερμικές διεργασίες, όπου χρησιμοποιείται θερμική ενέργεια για την παραγωγή κατάλληλης ποιότητας νερού, και στις μεμβράνες διαχωρισμού. Έχουν γίνει και προσπάθειες συνδυασμού των μεθόδων αυτών για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.

Οι κυριότερες μέθοδοι αφαλάτωσης νερού είναι :

- Αντίστροφη Ώσμωση (RO)
- Πολυβάθμια εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF)
- Πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation, MED)
- Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression)
- Ηλεκτροδιάλυση (ED)
- Ηλιακή εξάτμιση

Επίσης κυρίως για βιομηχανικές διεργασίες εκλεκτικής απομάκρυνσης ιόντων από το νερό, μπορεί να γίνει αφαλάτωση με συνδυασμό ιονοεναλλακτικών ρητινών. Η συγκεκριμένη μέθοδος όμως απλώς αναφέρεται στην παρούσα διπλωματική εργασία και δεν εξετάζεται.

1.4.1. Μέθοδοι Θερμικών Διεργασιών

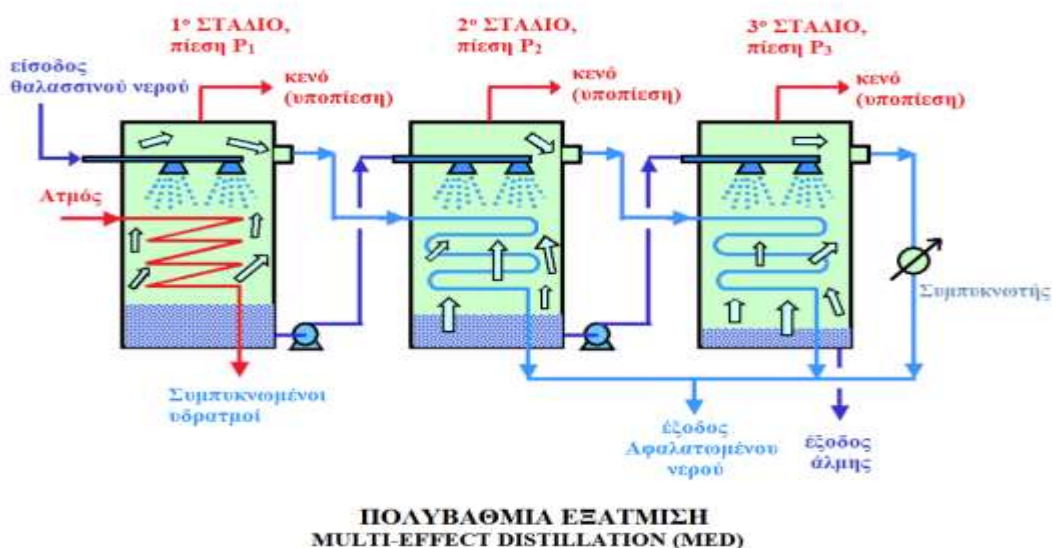
1.4.1.1 Πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation MED)

Η μέθοδος της πολυβάθμιας εξάτμισης είναι μια θερμική μέθοδος αλλαγής φάσης που χρησιμοποιείται περισσότερο εδώ και 100 χρόνια, η οποία όμως αντικαταστάθηκε από την πολυβάθμια εκτόνωση (η οποία παρά ταύτα έχει χαμηλότερο βαθμό απόδοσης).

Τα συστήματα μιας βαθμίδας διατάσσονται από μια πηγή θέρμανσης , έναν αποστακτήρα, έναν συμπυκνωτή και έναν διαχωριστή σταγόνων. Στην πραγματικότητα δεν συναντάμε σχεδόν ποτέ συστήματα μιας βαθμίδας μιας και είναι ενεργειακά ασύμφορα. Αντίθετα τα συστήματα πολυβάθμιας εξάτμισης αποτελούνται από περισσότερες βαθμίδες, δηλαδή πολλά εξατμιστήρια στη σειρά ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας του συστήματος.

Στην πολυβάθμια εξάτμιση η πηγή θέρμανσης συνεισφέρει μόνο στο πρώτο στάδιο όπου το προς κατεργασία νερό θερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία βρασμού του , υπό δεδομένη πίεση. Ο ατμός του ακατέργαστου νερού που παράγεται διοχετεύεται σε δίκτυο σωληνώσεων και περνάει στην επόμενη βαθμίδα η οποία βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση από την πρώτη για να επιτευχθεί πιο εύκολος βρασμός. Στην επόμενη βαθμίδα το ψυχρότερο ακατέργαστο νερό ψεκάζεται πάνω στις σωλήνες που μεταφέρουν τον ατμό της προηγούμενης βαθμίδας, τον συμπυκνώνουν και τελικά συλλέγεται ως καθαρό προϊόν. Σε κάθε θάλαμο υπάρχει αντλία κενού που βοηθά την εξάτμιση μειώνοντας την πίεση σε κάθε βαθμίδα και κάνοντας ίση με την πίεση κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία του κάθε θαλάμου . Συνήθως σε μια διεργασία πολυβάθμιας εξάτμισης η υψηλότερη θερμοκρασία βρασμού μπορεί να είναι οι 55°C, μειώνοντας έτσι και τα προβλήματα διαβρώσεων και δίνοντας την δυνατότητα η θερμότητα που θα χρησιμοποιηθεί να προέρχεται από χαμηλού επιπέδου απορριπτόμενη θερμότητα άλλης διεργασίας.

Στην πραγματικότητα ο εξερχόμενος ατμός κάθε βαθμίδας αποτελεί το προϊόν της διεργασίας (αφαλατωμένο νερό) το οποίο συμπυκνώνεται από το προϊόν του πυθμένα (άλμη) της προηγούμενης βαθμίδας.



Εικόνα 1-2 Σχηματική απεικόνιση πολυβάθμιας εξάτμισης

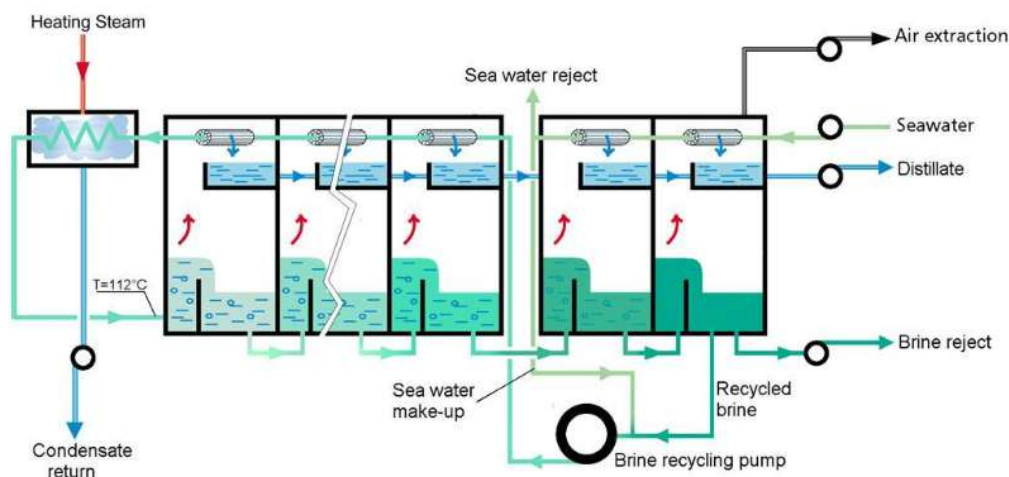
Πηγή : Γ.Κουμεντάκος, Σχεδιασμός αφαλάτωσης με ηλιακό εξατμιστή πίπτοντος υμένα, 2018

1.4.1.2. Πολυβάθμια εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF)

Η διεργασία της πολυβάθμιας εκτόνωσης δίνει την δυνατότητα να παράχθει υψηλής ποιότητας γλυκό νερό με πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις άλατος (περίπου 10ppm ή και λιγότερο). Είναι κατάλληλη για εφαρμογές μεγάλου μεγέθους. (1.000 – 60.000 m³). Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι πολύ διαδεδομένες στη Μέση Ανατολή και συγκεκριμένα στο Κουβέιτ, στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και στη Σαουδική Αραβία.

Στην πολυβάθμια εξάτμιση το ακατέργαστο νερό θερμαίνεται υπό ορισμένη πίεση σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από το σημείο βρασμού του και εν συνεχεία μπαίνει σε θάλαμο στον οποίο επικρατεί πίεση μικρότερη από αυτή του διαλύματος με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί απότομος βρασμός του. Το ακατέργαστο νερό ατμοποιείται μέχρι να επέλθει ισορροπία μεταξύ του διαλύματος και των σχηματιζόμενων ατμών. Οι ατμοί αποτελούν το καθαρό προϊόν και ερχόμενοι σε επαφή με το ψυχρότερο νερό που κυκλοφορεί στον θάλαμο συμπυκνώνονται και συλλέγονται. Για να μπορεί να λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της απότομης εξάτμισης του ακατέργαστου νερού σε κάθε βαθμίδα πρέπει ο επόμενος θάλαμος να βρίσκεται σε μικρότερη πίεση από τον προηγούμενο.

Αυτές οι εγκαταστάσεις συνηθίζεται να βρίσκονται κοντά σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς όπου ο ατμός θέρμανσης του διαλύματος εκτονώνεται πρώτα στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ισχύος και στην συνέχεια διοχετεύεται στην μονάδα αφαλάτωσης.



Εικόνα 1-3 Σχηματική απεικόνιση πολυβάθμιας εκτόνωσης.

Πηγή: <http://www.sidem-desalination.com/en/Process/MSF/>

1.4.1.3 Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression)

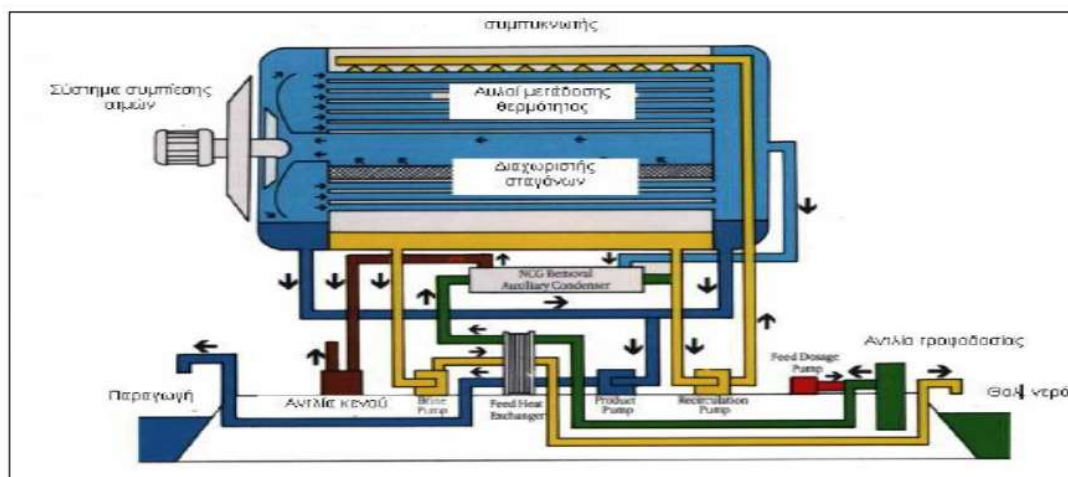
Η διεργασία αυτή συνήθως αναφέρεται σε μικρού και μεσαίου μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης και παράγει μέχρι και 3000m³ / ημέρα (π.χ. θέρετρα, βιοτεχνίες, απομακρυσμένες περιοχές).

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ιδιότητα του νερού να βράζει σε διαφορετικές θερμοκρασίες ανάλογα με την πίεσή του. Χρησιμοποιεί είτε μηχανικούς συμπιεστές ατμών (Mechanical Vapor Compression – MVC), είτε θερμικούς συμπιεστές ατμών (Thermal Vapor Compression)

Στην πρώτη περίπτωση παρέχεται από εξωτερική πηγή θερμότητας, θέρμανση στο διάλυμα μέχρι να φτάσει το σημείο βρασμού του υπό δεδομένη πίεση. Από αυτό το σημείο και έπειτα η διεργασία διατηρείται μόνο με την ενέργεια του συμπιεστή και με πιθανή λειτουργία της εξωτερικής πηγής θέρμανσης για να αντισταθμίσει της απώλειες θερμότητας.

Το κρύο ακατέργαστο νερό ψεκάζεται πάνω στους σωλήνες από τους οποίους περνά ατμός, θερμαίνεται και στη συνέχεια με την βοήθεια αεροσυμπιεστή, ο οποίος δημιουργεί υποπίεση, εξατμίζεται και εκτοξεύεται σε δίκτυο σωληνώσεων όπου έρχεται σε επαφή ξανά με το κρύο νερό συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως προϊόν.

Στην περίπτωση εκτελείται η ίδια διαδικασία με την μόνη διαφορά ότι η συμπύεση των ατμών γίνεται θερμικά από τον συμπιεστή με εκτόξευσή του.



Εικόνα 1-4 Σχηματική απεικόνιση εξάτμισης με συμπύεση ατμών.

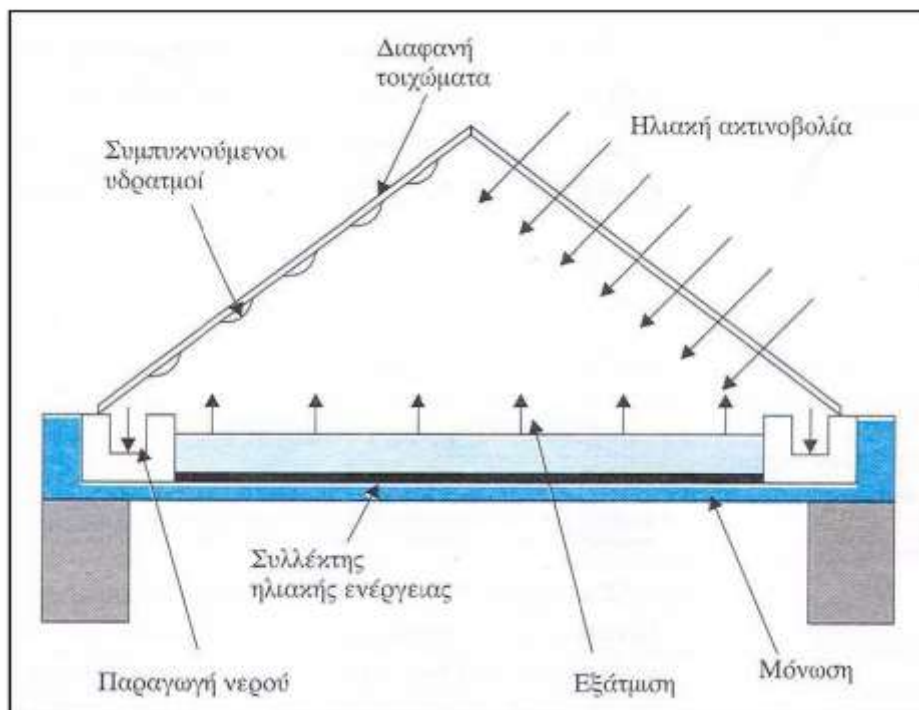
Πηγή : Helmece, ηλεκτρονικό δελτίο, Περισκόπιο των ναυτίλων Ν29, 2012

1.4.1.4 Ηλιακή εξάτμιση (Solar distillation)

Οι συσκευές της ηλιακής εξάτμισης αναπαράγουν ουσιαστικά τον υδρολογικό κύκλο σε πολύ μικρότερη κλίμακα. Ο σχεδιασμός ενός ηλιακού αποστακτήρα είναι παρόμοιος με το σχεδιασμό ενός θερμοκηπίου. Οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν στην κεκλιμένη διάφανη επιφάνεια της συσκευής που βρίσκεται στην οροφή και θερμαίνουν το προς κατεργασία νερό που βρίσκεται στον πυθμένα.

Το νερό αυτό εξατμίζεται και προσκρούει στην κεκλιμένη επιφάνεια της οροφής, όπου και συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως προϊόν από κατάλληλη διάταξη. Πρόκειται για μια διεργασία με μηδενικό λειτουργικό κόστος, πέραν από τις αντλίες κυκλοφορίας του ακατέργαστου νερού και του προϊόντος. Η μέγιστη θερμοκρασία που μιας τέτοιας διάταξης είναι 50-55°C το καλοκαίρι.

Οι συσκευές αυτές δεν είναι πολύ αποτελεσματικές αφού χρησιμοποιούν μόνο το 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και παράγουν μόνο 4 λίτρα ανά μέρα καθαρό νερό ανά τετραγωνικό μέτρο εδάφους. Για τον λόγο αυτό πρέπει να επιλέγονται φθηνά υλικά για την κατασκευή του . Επιπλέον λόγω της μικρής θερμοκρασίας που φτάνει το ακατέργαστο νερό χρήζει και σημαντικής μετά επεξεργασίας για να προσεγγίσει τα επιτρεπτά όρια χρήσης του.



Εικόνα 1-5 Σχηματική απεικόνιση ηλιακής εξάτμισης.

Πηγή : https://www.mou.gr/elibrary/AFALATOSI_08_08_2019.pdf

1.4.2 Μέθοδοι Μεμβρανών

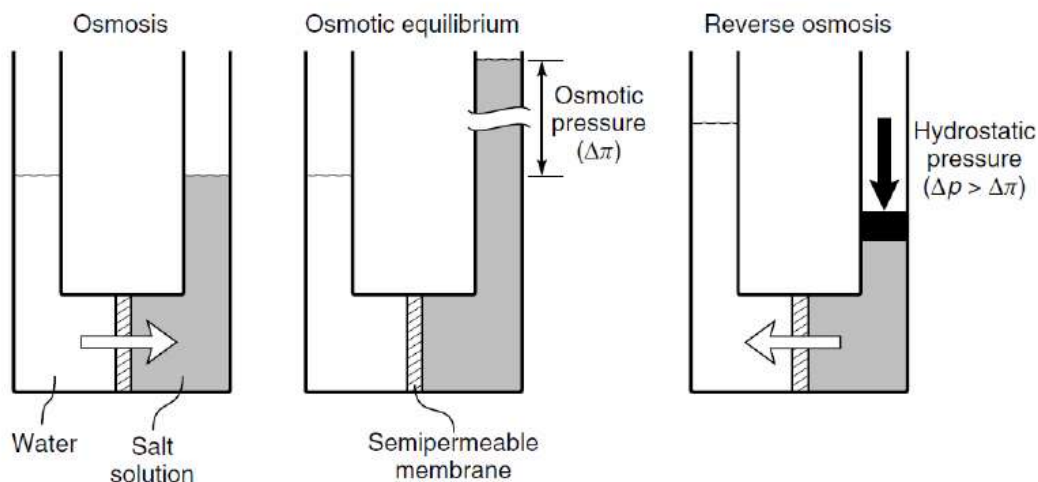
1.4.2.1. Αντίστροφη Ώσμωση (RO)

Η αρχή λειτουργίας της διεργασίας της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στηρίζεται στην αντιστροφή του φυσικού φαινομένου της ώσμωσης. Φυσιολογικά όταν δυο υγρά με διαφορετική συγκέντρωση βρεθούν σε ένα δοχείο και διαχωριστούν με μια ημιπερατή μεμβράνη τότε το υγρό με την μικρότερη συγκέντρωση θα μετακινηθεί προς αυτό με την μεγαλύτερη μέχρις ότου αποκατασταθεί ισορροπία μεταξύ τους. Η ισορροπία αυτή θα δημιουργήσει διαφορά της στάθμης του πυκνότερου διαλύματος με το αραιότερο η οποία θα αντιστοιχεί στην ωσμωτική πίεση.

Αν λοιπόν ασκήσουμε στο πυκνό διάλυμα πίεση μεγαλύτερη της ωσμωτικής θα λάβει χώρα το φαινόμενο της αντίστροφης ώσμωσης και στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει το αλατούχο διάλυμα θα κινηθεί προς το αραιό υγρό (διαλύτη). Έτσι θα

επιτευχθεί διαχωρισμός των αλάτων από το πυκνό διάλυμα και θα έχουμε την παραγωγή καθαρού νερού.

Η διαδικασία της ώσμωσης και της αντίστροφης ώσμωσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1-6 Σχηματική απεικόνιση αντίστροφης ώσμωσης.

Πηγή: Baker R., Membrane technology and applications, 2nd edition, p.30, Wiley, 2004

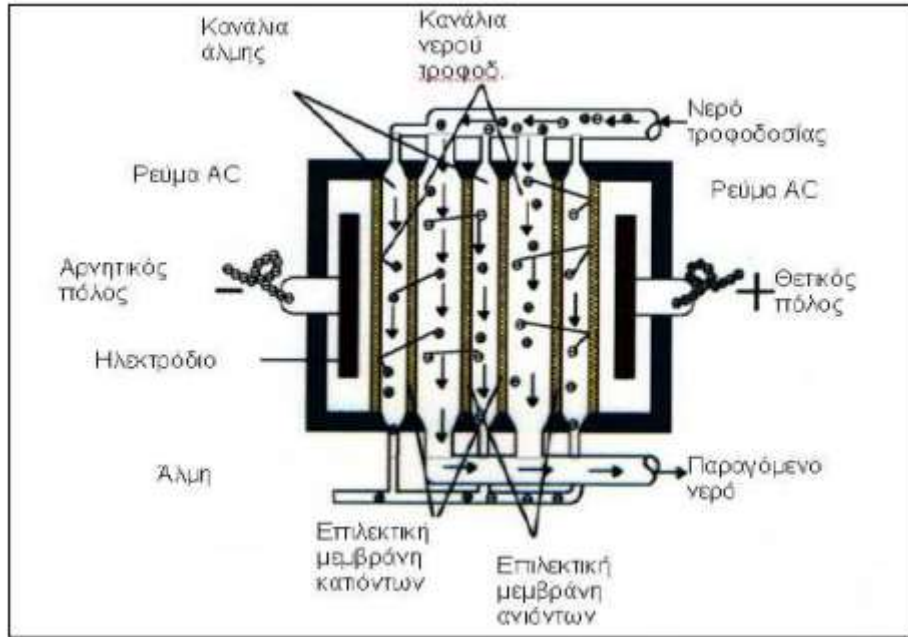
1.4.2.2. Ηλεκτροδιάλυση (ED)

Η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης αφορά μια ηλεκτροχημική διεργασία διαχωρισμού κατά την οποία τα ιόντα μεταφέρονται μέσω των μεμβρανών στην πλευρά όπου το διάλυμα έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση ιόντων, με την εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος.

Για την διεργασία της ηλεκτροδιάλυσης χρησιμοποιούνται μεμβράνες διαπερατές μόνο από ανιόντα ή κατιόντα οι οποίες τοποθετούνται εναλλάξ και παράλληλα σχηματίζοντας διαμερίσματα εύρους 1mm. Στην εικόνα δίνεται σχηματικά η διάταξη των μεμβρανών.

Ένα σύστημα ηλεκτροδιάλυσης περιέχει 100-400 μμεμβράνες, επιφάνειας 0,5-2 m².

Η απαιτούμενη ένταση ρεύματος είναι 100A στα 150V. Επειδή κατά την λειτουργία της μεθόδου αυτής, τα άλατα μεταφέρονται μέσω των συγκεκριμένων μεμβρανών προς μια κατεύθυνση, συχνά παρατηρείται το φαινόμενο του σχηματισμού ενός στρώματος επικαθίσεων αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης με αποτέλεσμα να μειώνεται η μεταφορά ιόντων και να υπολειτουργεί η μονάδα. Για να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα εφαρμόζεται στην διεργασία η τεχνική της αντίστροφης ηλεκτροδιάλυσης, όπου το συνεχές ρεύμα αλλάζει πολικότητα απαλλάσσοντας τις μεμβράνες από επικαθίσεις.



Εικόνα 1-7 Σχηματική απεικόνιση Ηλεκτροδιάλυσης.

Πηγή : Helmece, ηλεκτρονικό δελτίο, Περισκόπιο των ναυτίλων N29, 2012

1.4.3 Επιλογή Μεθόδου Αφαλάτωσης

Κάθε εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης αποτελεί ένα ξεχωριστό έργο. Κατά συνέπεια για να καταστεί βιώσιμη πρέπει να δοθεί πολύ μεγάλη προσοχή στον σχεδιασμό της και στις παραμέτρους που την διέπουν. Ο σωστός σχεδιασμός της μονάδας θα δώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα για το κάθε έργο τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής σκοπιάς. Άλλωστε το κυριότερο όλων σε μια τέτοια διαδικασία είναι το τελικό κόστος του αφαλατωμένου νερού ανά κυβικό μέτρο. Οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να ελεγχθούν είναι :

- Η ποιότητα του νερού που τροφοδοτεί την εγκατάσταση (θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό)
- Η ποσότητα και η τελική ποιότητα του αφαλατωμένου νερού
- Το κόστος της επένδυσης (κόστος εγκατάστασης αλλά και κόστος συντήρησης)
- Η χωροθέτηση της εγκατάστασης
- Οι ενεργειακές απαιτήσεις και οι διαθέσιμες πηγές ενέργειας
- Ο απαιτούμενος χρόνος παράδοσης του έργου
- Η διαθεσιμότητα και η εμπειρία του προσωπικού που θα αναλάβει το έργο
- Η δυνατότητα χρήσης ΑΠΕ, το δυναμικό τους και η δυνατότητα διασύνδεσης τους με την μονάδα

1.4.3.1 Σύγκριση μεθόδων Αφαλάτωσης

Για να γίνει σωστή σύγκριση και επιλογή μιας μεθόδου αφαλάτωσης πρέπει να μελετηθούν όπως αναφέρθηκε πολύ προσεκτικά οι παράμετροι που καταγράφηκαν παραπάνω.

Όσοσο είναι επιτακτική και η ανάγκη μελέτης του ενεργειακού αποτυπώματος της αφαλάτωσης, δηλαδή κατά κύριο λόγο της διάθεσης του αλμολοιπού, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τα επίπεδα ηχορύπανσης που προκαλεί, έτσι ώστε το τελικό πρόσημο να είναι θετικό και σε ότι αφορά το κόστος καθαρού νερού που παράγεται καθώς και της περιβαλλοντολογικής επιβάρυνσης της ίδιας της μεθόδου. Είναι προφανές ότι η κάθε μέθοδος έχει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες, ανάλογα με τις συνθήκες που εφαρμόζεται.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας σύγκρισης των μεθόδων αφαλάτωσης σε σχέση με τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας.

Πίνακας 1-3 Πίνακας Σύγκρισης Μεθόδων Αφαλάτωσης

Πηγή : Τζένου Ε. , 2010

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ						
ΜΕΘΟΔΟΣ	ΝΕΡΟ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ	ΜΟΡΦΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ (TDS ΣΕ ppm)	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ (m ³ /day)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (€/m ³ /day)
MSF	ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ	ΘΕΡΜΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	10	1000-60000	4-6 kWh/m ³	1000 - 2000
MED	ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ	ΘΕΡΜΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	10	500-20000	2.5-3 kWh/m ³	650-1750
VC	ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	10	25-2500	8-15 kWh/m ³	1000 - 2350
SWRO	ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	>500	0.4 - 70000 ΚΑΙ ΠΑΝΩ	<5 kWh/m ³	650 - 4400
BWRO	ΥΦΑΛΜΥΡΟ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	250-500	2,5 - 50000 ΚΑΙ ΠΑΝΩ	0.5-3 kWh/m ³	300 - 2000
ED	ΥΦΑΛΜΥΡΟ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ	300-500	15-50000	1.5-4 kWh/m ³	1000 - 5000

1.4.3.2. Πλεονεκτήματα Αντίστροφης Ώσμωσης

Συμπερασματικά όπως προκύπτει και σε επίπεδο εφαρμογής αλλά και σε επίπεδο ανάλυσης των δεδομένων που αναφέρθηκαν παραπάνω, η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης έχει επικρατήσει. Η μέθοδος αυτή συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα τα οποία παραθέτονται παρακάτω :

- Μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, αφού το νερό τροφοδοσίας μπορεί να είναι είτε θαλασσινό είτε υφάλμυρο.
- Έχει εφαρμογή σε μεγάλος εύρος παραγωγής νερού, είτε πρόκειται για εγκαταστάσεις μεγάλης είτε μικρής δυναμικότητας.
- Λόγω της απλότητας της κατασκευής της, καθώς και λόγω της μεγάλης ανάπτυξης της μεθόδου από τεχνικής άποψης, οι μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση χαρακτηρίζονται ως αξιόπιστες.

- Σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους η κατανάλωση ενέργειας κινείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.
- Η κατασκευή της μπορεί να είναι modular και compact και κατά συνέπεια παρατηρείτε το “στήσιμό ” της σε ένα container.
- Οι μονάδες αυτές δεν έχουν απαίτηση από μεγάλο χώρο εγκατάστασης, καθώς είναι και πολύ μικρότερες σε όγκο για την ίδια ποσότητα παραγόμενου νερού σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.
- Δεν απαιτείτε μεγάλος χρόνος κατασκευής μια τέτοιας μονάδας. Μάλιστα μπορεί να κατασκευαστεί ακόμα και μέσα σε διάστημα ενός μήνα.
- Δεν απαιτείτε θέρμανση του νερού τροφοδοσίας και επομένως έχει χαμηλότερες θερμικές απώλειες, λιγότερα προβλήματα διάβρωσης, υψηλότερο βαθμό απόδοσης και δυνατότητα απομάκρυνσης μαζί με τα άλατα, και άλλων συστατικών που δεν πρέπει να καταλήξουν στο τελικό προϊόν, όπως για παράδειγμα βακτήρια και μικροοργανισμοί.
- Όταν εφαρμόζεται σε θαλασσινό νερό δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης συστήματος ανάκτησης ενέργειας για ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση.



Εικόνα 1-8 Εγκατάσταση μονάδας RO σε container στα χυτά Τρικάλων

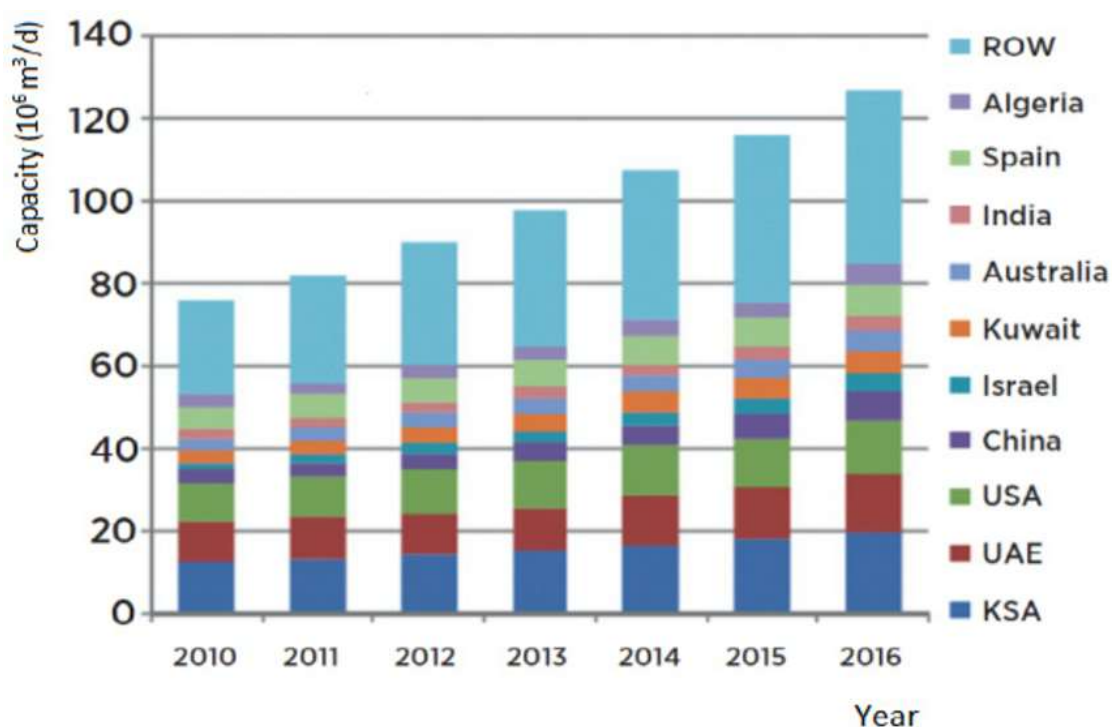
Πηγή : <https://www.sychem.gr/>

1.4.4. Εγκαταστάσεις μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση σε διεθνή και εγχώριο επίπεδο.

Οι εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης έχουν αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Θα παρατηρήσουμε όμως πόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό εγκατεστημένων μονάδων της μεθόδου της αντίστροφης ώσμωσης συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες.

Πίνακας 1-4 Πίνακας καταγραφής παραγωγής αφαλατωμένου νερού σε παγκόσμιο επίπεδο

Πηγή : Desalination Technologies: Hellenic Experience, Konstantinos Zotalis, Emmanuel Dialynas, N. Mamassis, A. Angelakis , May 2014



Επίσης παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης – ανεξαρτήτως μεθόδου - που είτε λειτουργούν είτε βρίσκονται υπό κατασκευή.

Πίνακας 1-5 Πίνακας με τις δέκα μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως

THE BIGGEST PROJECTS OF DESALINATION GLOBALLY(DONE OR ANNOUNCED)		
DESALINATION PLANT	YEAR OF STARTED OPERATION	PRODUCTIVITY (m ³ /day)
Ras Al Khair , Saudi Arabia	2014	1.036.000
Taweelah,UAE	Not done	909.200
Shuaiba 3,Saudi Arabia	2019	1.282.000
Jubail Water and Power Company,Saudi Arabia	2010	80.000
Um Al Quwain, UAE	Aprox. 2022	682.900
DEWA station M,Dubai	2012	636.000
Sorek , Israel	Not done	624.000
Jubail 3A IWP,Saudi Arabia	Aprox. 2022	600.000
Sorek 2, Israel	Not done	570.000
Fujairah 2, United Arab Emirates	Not done	591.000

1.4.4.1. Κόστος αφαλατωμένου νερού σε χώρες με ευρεία εφαρμογή της μεθόδου

Παρακάτω επιγραμματικά αναφέρεται το κόστος αφαλατωμένου νερού ανά κυβικό μέτρο σε διάφορες χώρες παγκοσμίως:

1. Στην Μάλτα, όπου το 70% της συνολικής κατανάλωσης νερού προέρχεται από εργοστάσια αφαλάτωσης, το κόστος του κυμαίνεται μεταξύ **0.45 €/m³** και **0.54 €/m³**.
2. Στο Ισραήλ το κόστος αφαλατωμένου νερού που παράγεται στο εργοστάσιο του Ashkelon κυμαίνεται από **0.61 €/m³** μέχρι και **0.94 €/m³**. Το συνολικό κόστος φαίνεται σχετικά υψηλό λόγω : i) της τεχνολογίας που επιλέχθηκε (πολυβάθμια εξάτμιση) και ii) της υψηλής συγκέντρωσης TDS (47,000-50,000 mg/L) του θαλασσινού νερού προς επεξεργασία.
3. Στην ανατολική Αυστραλία, σε περιοχές με πολύ χαμηλά αποθέματα διαθέσιμου πόσιμου νερού, η παροχή του νερού εξασφαλίζεται τα τελευταία δέκα χρόνια από εργοστάσια αφαλάτωσης με το συνολικό κόστος να κυμαίνεται από **0.45 €/m³** μέχρι και **0.54 €/m³**.
4. Στην Καλιφόρνια όπου λειτουργούν πάνω από 20 εργοστάσια αφαλάτωσης καλύπτοντας το 15% των συνολικών αναγκών νερού. Ένα από αυτά τα εργοστάσια (Carlsbad) το οποίο παράγει 190,000m³/d εκτιμάται ότι παράγει το 8% της συνολικής ζήτησης νερού στο Σαν Ντιέγκο το κόστος του οποίου ανέρχεται στα **0.50 €/m³**.
5. Στην Ελλάδα και ειδικότερα στα νησιά του Αιγαίου με έντονη τουριστική δραστηριότητα λειτουργούν αρκετές μονάδες αφαλάτωσης με νερό τροφοδοσίας από την θάλασσα. Το κόστος του αφαλατωμένου νερού κυμαίνεται από **0.60 €/m³** μέχρι και **0.70 €/m³**. Στις περιπτώσεις δε που το νερό τροφοδοσίας στις μονάδες είναι υφάλμυρο το κόστος μειώνεται στο εύρος των **0.30 €/m³** έως και **0.40 €/m³**.



Εικόνα 1-9 Εργοστάσιο αφαλάτωσης θαλασσινού νερού στο Περθ της Αυστραλίας.

Πηγή : Low energy consumption in Perth seawater desalination plant, Miguel Angel Sanz, Richard Stover, January 2007

1.4.4.2. Η εξέλιξη της αφαλάτωσης στην Ελλάδα ανά τα έτη

Στην Ελλάδα εκτιμάται ότι λειτουργούν πάνω από 48 δημοτικές μονάδες αφαλάτωσης με συνολική παραγόμενη ποσότητα νερού ύδρευσης 24.000 m³/ημέρα και 100 ιδιωτικές (κυρίως σε ξενοδοχειακές μονάδες και στην βιομηχανία). Οι δυναμικότητες των μονάδων αφαλάτωσης στην Ελλάδα κυμαίνονται από 30 έως 3.500 m³/ημέρα.

Πίνακας 1-6 Οι δέκα μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα.

10 BIGGEST DESALINATION PLANTS IN GREECE						
PROJECT	YEAR	TYPE	CAPACITY (m ³ /d)	INITIAL COST (M €)	OPERATION COST (€/m ³)	CONTRACTOR
Omiroupolis Chios Municipality 2nd	2005	RO	3000	0,71	0,26	Culligan Greece
Almyros, Iraklion	2014	RO&UF	2400	0,85	0,25	Sychem S.A., Greece
Syros 6th, Ermoupolis	2002	RO(SW)	2000	0,313	0,4	Temak, GR
Mykonos, Korfu	2001	RO	2000	1,276	0,5	Culligan Greece

Paros, Naousa	2001	RO	1200	0,415	0,5	Ionics Itaba
Syros 7th, Ano Syros	2005	RO	1000	1,000	0,4	Temak, GR
Posidonia, Municipality 2nd	2005	RO	1000	0,574	0,45	Culligan Greece
Syros 1st, Ermoupoli	1992	RO	800	0,589	2,7	Christ CH
Syros 2st, Ermoupoli	1997	RO	800	1,482	2,7	Christ CH
Ithaki, Kefallonia 1rst	1981	RO	620	0,264	2,88	Christ CH

1.4.5 Θεσμικό πλαίσιο

1.4.5.1. Θεσμικό πλαίσιο για την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της λειψυδρίας, έχουν θεσμοθετηθεί ρυθμίσεις τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε διεθνές επίπεδο που ευνοούν την εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης. Οι ρυθμίσεις αυτές ορίζουν και κατευθύνουν τα κριτήρια χωροθέτησης, τους όρους αδειοδότησης και τα ανώτερα επιτρεπτά όρια λειτουργίας της ενέργειας. Οι αντίστοιχες διατάξεις έχουν ως γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος και τον περιορισμό των αρνητικών κοινωνικών και οικονομικών επιδράσεων στους κατοίκους της περιοχής που θα τοποθετηθεί η μονάδα.

Ορισμένες από τις σημαντικότερες διατάξεις που αφορούν σε θέματα αφαλάτωσης και ενδεχόμενης σύνδεσης τους με μονάδα παραγωγής ενέργειας που λειτουργεί από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, καταγράφονται επιγραμματικά παρακάτω :

- **Νόμος 1739/1987**, ο οποίος εκδόθηκε από το Υπουργείο Ανάπτυξης το 1987, με στόχο τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, στο πλαίσιο του οποίου η Ελλάδα χωρίζεται σε 14 υδατικά διαμερίσματα.
- **Πρωτόκολλο του Κιότο**, δεσμευτική συμφωνία 141 χωρών που τέθηκε σε ισχύ από το 2005 και αφορά την καταπολέμηση της αλλαγής κλίματος. Προβλέπει ένα σύνολο δράσεων για την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα αέρια του θερμοκηπίου, αλλά και πλήθος άλλων ενεργειακών ζητημάτων προτείνοντας διαφορετικές πολιτικές δράσεις.
- **Οδηγία 2000/60/ΕΚ**, σύμφωνα με την οποία εισάγεται η οικολογική ποιότητα των υδάτων και μια νέα προσέγγιση για την διαχείριση των υδατικών πόρων. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθείται σε επίπεδο λεκάνης απορροής :
 - Ανάλυση Πιέσεων
 - Ανάλυση Επιδράσεων
 - Ανάλυση Οικονομικών

- Ανάλυση Συμμετοχής
- Ανάλυση Δικτύου Παρακολούθησης
- **Νόμος 3199/2003 και Προεδρικό Διάταγμα 51/2007**, «Περί Προστασίας & Διαχείρισης Υδάτων », σύμφωνα με την οποία ενσωματώνεται η Οδηγία 2000/60/ΕΚ στην Ελληνική Νομοθεσία. Δημιουργεί τις αρμόδιες αρχές, Εθνική Επιτροπή Υδάτων, Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων, Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, Διευθύνσεις Υδάτων Περιφέρειας και Περιφερειακό Συμβούλιο Υδάτων, με σκοπό την κατάλληλη διευθέτηση της εναρμόνισης της Οδηγίας – πλαίσιο.
- **Νόμος 1650/1986, άρθρο 28**, ορίζει τις κυρώσεις για τη μη τήρηση των προβλεπόμενων διατάξεων της οδηγίας 2000/60/ΕΚ.
- **Απόφαση αριθ.2455/2001/ΕΚ του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου**, τροποποιεί την Οδηγία – πλαίσιο θεσπίζοντας κατάλογο ουσιών προτεραιότητας των υδάτων, συμπληρώνοντας την Οδηγία 76/464/ΕΟΚ.
- **Οδηγία 2005/89/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 18^{ης} Ιανουαρίου 2006**, περί μέτρων διασφάλισης του εφοδιασμού με ηλεκτρισμό και περί επενδύσεων υποδομής.
- **Νόμος 1739//1987 και Προεδρικό Διάταγμα 256/1989**, για την χορήγηση αδειών χρήσης νερού.
- **Ν.3937/2011(ΦΕΚ α.60 31.3.2011),αρ 30**: «Εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης για την εξυπηρέτηση των υδρευτικών αναγκών των οργανισμών τοπικής αυτοδιοίκησης των νησιών του Αιγαίου»

Για την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων παραγωγής ύδρευσης μέσω αφαλάτωσης σε νησιά που εντάσσονται στην αρμοδιότητα της Γενικής Γραμματείας Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής του Υπουργείου Θαλάσσιων Υποθέσεων, Νήσων και Αλιείας, δεν απαιτείται οικοδομική άδεια, αλλά έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την αρμόδια Διεύθυνση Πολεοδομίας και δεν εφαρμόζονται οι διατάξεις που ορίζονται από την ΚΥΑ 13727/724/5.8.2003 (ΦΕΚ Β1087). Για τις εν λόγω διατάξεις τίθενται οι παρακάτω περιορισμοί :

- Η ημερήσια δυναμικότητα τους πρέπει να είναι κάτω των 500 m³ νερού και 700 m³ κατά τους θερινούς μήνες
- Το παραγόμενο νερό θα πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κάλυψη των αναγκών των αντίστοιχων Ο.Τ.Α.

1.4.5.2. Νομοθετικό πλαίσιο για την απόρριψη της άλμης

Πέρα από την θεσμοθέτηση διατάξεων που διέπουν την κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση μια μονάδας αφαλάτωσης, υπάρχει ένα αυστηρό νομοθετικό πλαίσιο τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε διεθνές επίπεδο, που αφορά την απόρριψη της άλμης.

Όπως έχει αναφερθεί αλλά και όπως θα αναλυθεί παρακάτω η άλμη είναι ο κυριότερος ρυπογόνος παράγοντας μια μονάδας αφαλάτωσης, επομένως κρίθηκε απαραίτητος ο καθορισμός επαρκών μέτρων και η επιβολή κυρώσεων για την προστασία του περιβάλλοντος από τις αρνητικές επιδράσεις της μη σωστής εναπόθεσης του αλμολοιπού. Κατά συνέπεια, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα εξής :

- Ορίζονται ποιες πρέπει να είναι οι οριακές τιμές των εκπομπών στο σημείο απόρριψης, οι οποίες ελέγχονται μέσω περιβαλλοντικών προτύπων. Προβλέπονται ακόμη και ορισμένες τεχνικές επεξεργασίας και ανακύκλωσης των ρευμάτων εκροής. Τα ποικίλα επιτρεπτά όρια καθιερώνονται βάσει εθνικού δικαίου, ενώ ακόμα πιο σαφείς νομοθετικές διατάξεις διέπουν τα βιομηχανικά απόβλητα.
- Οι βασικές παράμετροι απορρίψεων από μονάδες αφαλάτωσης είναι :
 - Θερμοκρασία
 - Αλατότητα
 - pH
 - Διαλυμένο οξυγόνο και οργανικό φορτίο
 - Χαλκός
 - Νικέλιο
 - Χλώριο
- Ευρωπαϊκή οδηγία – Πλαίσιο για τα WFD (ΟΠΥ)

Αποτελεί ένα πλαίσιο της υδατικής πολιτικής της ΕΕ και συμπληρώνεται από άλλες νομοθετικές ρυθμίσεις, οι οποίες διέπουν συγκεκριμένες πτυχές της χρήσης των υδάτων:

- Την οδηγία για τα υπόγεια ύδατα (2006)
- Την οδηγία για τα περιβαλλοντικά πρότυπα ποιότητας (2008)
- Δύο αποφάσεις της Επιτροπής (2005 και 2008), για την οικολογική κατάσταση, οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση κατάρτισης μητρώου περίπου 1500 τόπων που περιλαμβάνονται σε εγχείρημα διαβαθμονόμησης, ούτως ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση προτύπων από διαφορετικές χώρες και δημοσιεύσεις των αποτελεσμάτων
- Έχει απαγορευτεί η άμεση διάχυση της άλμης σε υδάτινο φορέα και έχει επιβληθεί η έμμεση διάθεση της σε υπόγεια ύδατα μόνο ύστερα από φιλτράρισμα
- Στις ΗΠΑ υπάρχουν Ομοσπονδιακοί Κανονισμοί που αφορούν στα απόβλητα των μεμβρανών
- Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα για την διεθνή ανάπτυξη απαιτείται η μείωση της θερμοκρασίας πριν την απόρριψη της άλμης.

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, η εκάστοτε Νομαρχία εξουσιοδοτείται ως υπεύθυνη για να θεσπίσει τα κατάλληλα μέτρα που καθορίζουν τα είδη, τις

προϋποθέσεις, την επεξεργασία και τις οριακές τιμές των τοξικών αποβλήτων που καταλήγουν σε θαλάσσιους αποδέκτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Ανάλυση σύγχρονων μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση

2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου

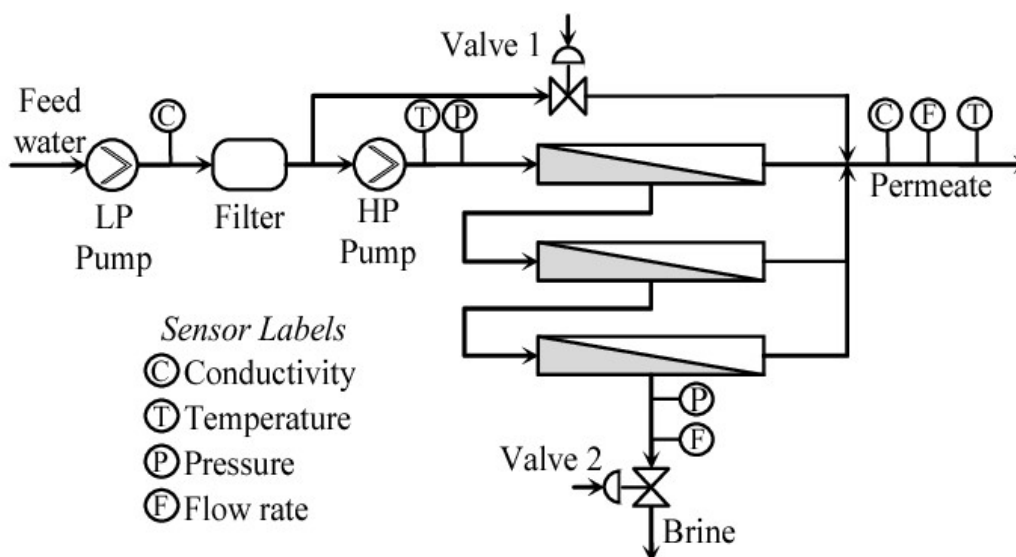
2.1.1 Στάδια και διάγραμμα Ροής

Ένα σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, αποτελείται σε γενικές γραμμές από τα παρακάτω τμήματα:

1. Το σύστημα προκατεργασίας του νερού
2. Το κύριο σύστημα της αφαλάτωσης
3. Το σύστημα μετεπεξεργασίας του νερού (εφόσον το προϊόν προορίζεται για ύδρευση – πόση

Βεβαίως, πριν από το σύστημα προκατεργασίας απαιτείται ένα σύστημα άντλησης-τροφοδοσίας ακατέργαστου νερού στο σύστημα. Αυτό καθορίζει σημαντικά τις παραμέτρους σχεδιασμού του συστήματος όμως τυπικά δεν αποτελεί μέρος της αφαλάτωσης.

Παρακάτω παρατίθεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής (P&ID) ενός συστήματος αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση με τρεις μεμβράνες και χωρίς σύστημα ανάκτησης ενέργειας.



Σχήμα 2-1 Απλοποιημένο Διάγραμμα Ροής Μονάδας Αφαλάτωσης με RO

Πηγή : Control of a Reverse Osmosis plant by using a robust PID design based on multi-objective optimization, A. Gambier , 2011

2.2 Τροφοδοσία – Άντληση

2.1.1 Τεχνικές Αναρρόφησης Ακατέργαστου Νερού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα συστήματα αφαλάτωσης, ανεξαρτήτως μεγέθους και δυναμικότητας, απαιτούν ένα σύστημα άντλησης του ακατέργαστου νερού στο στάδιο της προκατεργασίας. Το ακατέργαστο νερό είναι σημαντικό να εισέρχεται στην μονάδα με μια σχετικά σταθερή ποιότητα και παράλληλα να προκαλεί τις λιγότερο δυνατές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Το είδος της πρόσληψης ακατέργαστου νερού αποτελεί το πρώτο στάδιο στην προεπεξεργασία επηρεάζοντας κρίσιμα τα χαρακτηριστικά του ακατέργαστου νερού καθώς και το σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος προεπεξεργασίας αλλά και του γενικότερου σχεδιασμού της διεργασίας της αφαλάτωσης.

Ο σχεδιασμός, η παραμετροποίηση, η παρακολούθηση καθώς και οι υπόλοιπες ενέργειες που πιθανόν θα απαιτηθούν μπορεί να καλύψουν από 10 έως το 30% του αρχικού κόστους κεφαλαίου ολόκληρης της εγκατάστασης αφαλάτωσης. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα αναρρόφησης θα προστατεύει όχι μόνο τον κατάντη εξοπλισμό και θα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην υδρόβια ζωή, αλλά θα αναβαθμίσει την απόδοση ολόκληρης της διεργασίας μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης του συστήματος προεπεξεργασίας και το λειτουργικό κόστος ολόκληρης της μονάδας αφαλάτωσης καθώς και θα μας προφυλάξει από συχνές δυσλειτουργίες ολόκληρου του συστήματος και πιθανά έξοδα επισκευής.

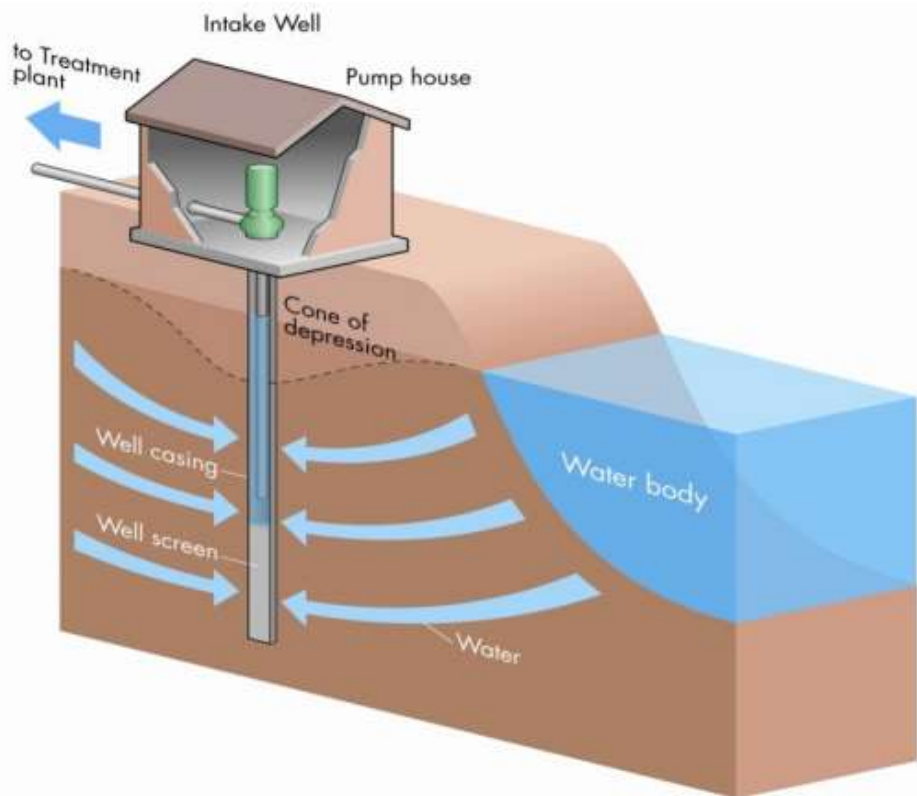
Για την άντληση νερού σε μια μονάδα αφαλάτωσης χρησιμοποιούνται δύο γενικές τεχνικές :

i) Η υπεδάφια αναρρόφηση όπως πηγάδια, γεωτρήσεις κλπ και ii) η ανοιχτή αναρρόφηση. Τα πηγάδια πρόσληψης θαλασσινού νερού μπορεί να αποτελούνται είτε από κάθετους είτε από οριζόντιους συλλέκτες και απαιτείται η εγκατάστασή τους σε κοντινή απόσταση από την θάλασσα.

Η μοναδική περίπτωση που επιτρέπει τη συλλογή ακατέργαστου νερού από πηγάδια σε αποστάσεις μακριά από το επίπεδο της θάλασσας, είναι η ύπαρξη λεκανών μεγάλου πορώδους και περατότητας που επιτρέπουν την μεταφορά θαλασσινού νερού υπεδάφια (ασβεστολιθικοί σχηματισμοί που συναντώνται κυρίως στην Μεσόγειο και την Καραϊβική). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η χωροθέτηση της μονάδας αφαλάτωσης να μπορεί να γίνει πιο κοντά στους καταναλωτές και να μειώσει το κόστος άντλησης του ακατέργαστου νερού.

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας υφάλμυρου νερού συνήθως χρησιμοποιούν πηγάδια για την αναρρόφηση του νερού, από τον υδροφόρο ορίζοντα της ενδοχώρας (in-land).

Η κατασκευή πηγαδιών αναρρόφησης είναι σχετικά εύκολη και το ακατέργαστο νερό (θαλασσινό ή υφάλμυρο) που συλλέγεται είναι προκατεργασμένο με αργή διήθηση μέσω των υπόγειων σχηματισμών της άμμου (sand/seabed). Τα κατακόρυφα πηγάδια αναρρόφησης (όπως στο σχήμα 2.1) είναι γενικά οικονομικότερα στην κατασκευή σε σχέση με τα οριζόντια, όμως η δυναμικότητά τους είναι σχετικά μικρή.

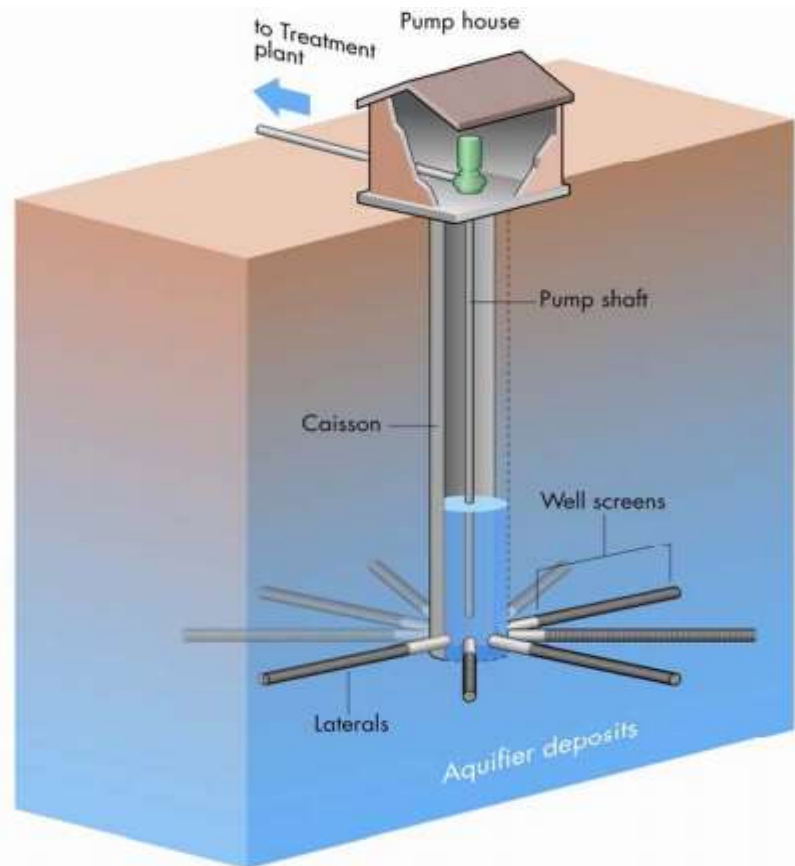


Σχήμα 2-2 Κάθετο πηγάδι αναρρόφησης

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 52, Wiley, 2008

Τα οριζόντια πηγάδια αναρρόφησης είναι καταλληλότερα για μεγάλες εγκαταστάσεις αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και εφαρμόζονται με δύο τεχνικές:

i) Ως πηγάδια με συλλέκτες αξονικούς τύπου Ranney (radial Ranney-type collector) και ως οριζόντιοι συλλέκτες διάτρητοι εγκάρσια (HDD, horizontal directionally drilled collectors) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2..



Σχήμα 2-3 Οριζόντιο πηγάδι αναρρόφησης

Πηγή: Li N., Fane A., Winston W.H., Matsuura T., *Advanced membrane technology and applications*, p. 52, Wiley, 2008

Σε συνέχεια των παραπάνω σε περιοχές όπου κρίνεται αδύνατη η διάνοιξη πηγαδιών λόγω αργιλικής φύσης του εδάφους εφαρμόζεται η υπεδάφια αναρρόφηση με διάτρητους σωλήνες. Πρόκειται για μια αρκετά αποτελεσματική μέθοδο η οποία προσφέρει επαρκή παροχή ακατέργαστου νερού μειωμένης περιεκτικότητας σε αιωρούμενα σωματίδια. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί εξαιρετικά άρτια τεχνική εγκατάσταση των σωλήνων, εξαρτώμενη από τις ιδιομορφίες της περιοχής.



Εικόνα 2-1 Τοποθέτηση οριζόντιου διάτρητου σωλήνα αναρρόφησης

Πηγή : Water Reuse association, Overview of Desalination Plant Intake Alternatives, White Paper 2011

2.2.2. Σύγκριση Τεχνικών Αναρρόφησης

Η επιλογή μεταξύ των τεχνικών αναρρόφησης για μία εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης εξαρτάται ιδιαίτερα από τις τοπικές συνθήκες και πρακτικά εξετάζεται ξεχωριστά κατά περίπτωση. Η αναρρόφηση θαλασσινού νερού με παραθαλάσσια πηγάδια έχει το πλεονέκτημα ότι παρέχει συνήθως καλύτερη ποιότητα σε αιωρούμενα στερεά, λάσπη, λάδια, λίπη και επιβάρυνση σε φυσικό οργανικό φορτίο και θαλάσσιους μικροοργανισμούς. Μάλιστα, αναφέρεται ότι το κόστος παραγόμενου νερού σε μία μεσαίας δυναμικότητας εγκατάσταση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με άντληση υψηλής ποιότητας θαλασσινού νερού από παραθαλάσσια πηγάδια σε σχέση με ανοικτή αναρρόφηση μπορεί να είναι μιάμιση έως δύο φορές καλύτερο. Παρόλα αυτά προκύπτει ότι η εφαρμογή τους περιορίζεται όσο αυξάνεται η απαιτούμενη παροχή θαλασσινού νερού, ειδικά όταν μιλάμε για μονάδες αφαλάτωσης δυναμικότητας άνω των 10.000m³/ημέρα.

Η κατασκευή αγωγών ανοικτής αναρρόφησης μπορεί να εφαρμοστεί για όλες τις δυναμικότητες αλλά συνήθως είναι περισσότερο συμφέρουσα οικονομικά για εγκαταστάσεις με δυναμικότητα παραγωγής μεγαλύτερης των 20.000 m³ ανά ημέρα.

Η υπεδάφια αναρρόφηση θαλασσινού νερού σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές παρέχει το πλεονέκτημα μίας στοιχειώδους διήθησης (φιλτραρίσματος) του θαλασσινού νερού, δεν εγκλωβίζει θαλάσσιους οργανισμούς και δεν προκαλεί αισθητική ρύπανση σε μία ακτή. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι δεν μπορεί να

εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε ακτή και ότι θέλει εξαιρετικά προσεκτική εγκατάσταση.

2.3 Προκατεργασία

2.3.1 Τεχνικές Προκατεργασίας Ακατέργαστου Νερού

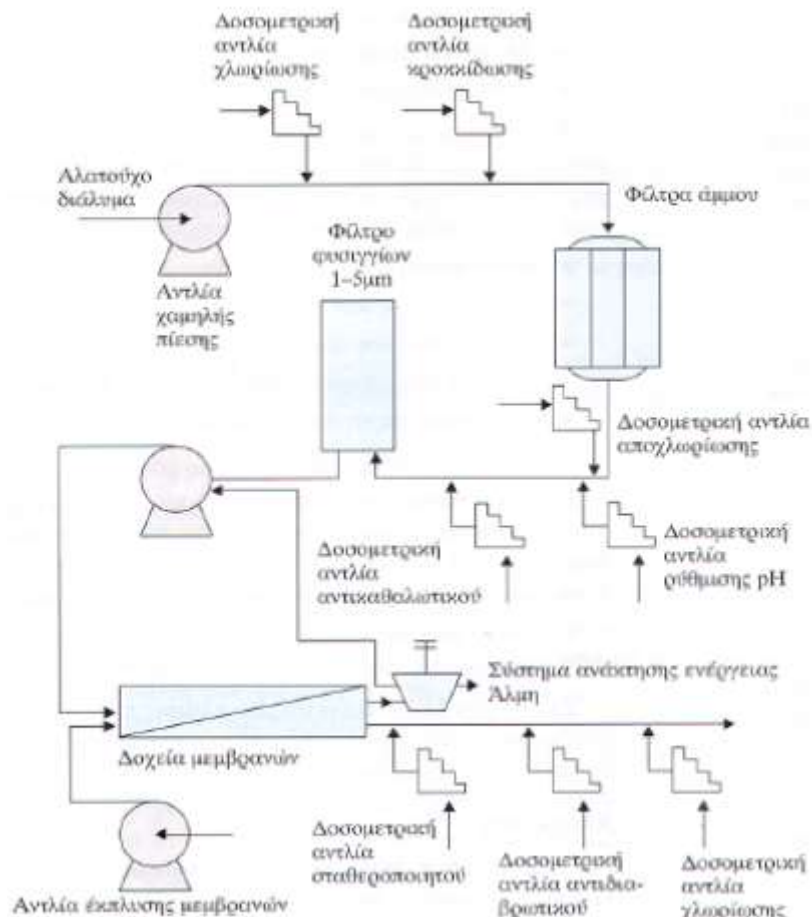
Η προκατεργασία βελτιώνει την ποιότητα του ακατέργαστου νερού τροφοδοσίας ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή απόδοση και η επιθυμητή παροχή στην αφαλάτωση. Είναι δεδομένο ότι όλες οι διεργασίες αφαλάτωσης απαιτούν μία μικρή προκατεργασία ακόμα και στοιχειώδη.

Το επίπεδο και το είδος της απαιτούμενης προκατεργασίας εξαρτάται από την πηγή και την ποιότητα του ακατέργαστου νερού. Για παράδειγμα όταν η πηγή είναι ένα πηγάδι ή μία γεώτρηση (υπόγεια νερά) συνήθως απαιτείται μία πολύ απλή προκατεργασία σε επίπεδο προσθήκης αντικαθαλατωτικού χημικού ή ακόμα και απλή προσθήκη οξέος, σε συνδυασμό με διήθηση σε φίλτρα φυσιγγίων για την κατακράτηση των σωματιδίων μεγέθους άνω των 5 μικρών.

Η προκατεργασία έχει ως κύριο στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της διεργασίας και την αξιόπιστη λειτουργία των μεμβρανών μειώνοντας τα παρακάτω φαινόμενα:

- Επικαθήσεις αλάτων
- Μόλυνση / Έμφραξη μεμβρανών
- Αποικοδόμηση μεμβρανών

Για το σχεδιασμό του συστήματος προκατεργασίας θα πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη το αρχικό κόστος εγκατάστασης του, το κόστος λειτουργίας του καθώς και η μείωση των όποιων επιπτώσεων του στο περιβάλλον (ειδικά για τις μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης νερού). Στην εικόνα 2.2 φαίνεται απλοποιημένο διάγραμμα ροής αφαλάτωσης με σύστημα ανάκτησης ενέργειας (από το αλμόλοιπο).



Εικόνα 2-2 P&ID διεργασίας αφαλάτωσης (RO) με ανάκτηση ενέργειας

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντιστροφή ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

Για το σχεδιασμό του συστήματος προκατεργασίας απαιτείται η γνώση των παρακάτω παραμέτρων :

- Η προέλευση του νερού τροφοδοσίας προς αφαλάτωση
- Η φυσικοχημική και μικροβιολογική σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας
- Ο τύπος των μεμβρανών που θα χρησιμοποιηθούν και η διάταξή τους
- Η δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης
- Η ποιότητα του παραγόμενου νερού
- Το ποσοστό ανάκτησης νερού (λόγος παροχής παραγόμενου προς ακατέργαστο νερό)

Επιγραμματικά αναφέρονται οι τεχνικές προκατεργασίας και στην συνέχεια θα αναλυθούν οι πιο συνήθεις από αυτές που εφαρμόζονται σε μονάδες αφαλάτωσης δυναμικότητας ανάλογης αυτής που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία :

- Απολύμανση με χρήση χλωρίου

- Κροκίδωση – Συσσωμάτωση (θρόμβωση)
- Διήθηση σε πολυστρωματικά φίλτρα
- Αποχλωρίωση
- Ρύθμιση pH
- Προσθήκη Αντικαθαλατωτικού
- Διήθηση με φίλτρα Φυσιγγίων ή Σάκου
- Διεργασίες Διπλής μεμβράνης για την ανάκτηση-ανακύκλωση νερού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το επίπεδο προκατεργασίας και ο καθορισμός των επιμέρους τεχνικών που θα χρησιμοποιηθούν σε μια μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση εξαρτάται κυρίως από την πηγή τροφοδοσίας. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η υπερβολική προκατεργασία σε ένα νερό με χαμηλή τάση πρόκλησης έμφραξης μεμβρανών μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες και να αποτελέσει παράγοντα αποσταθεροποίησης της μονάδας. Έτσι σε μια μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση η πιο συνήθης διαδικασία προκατεργασίας αποτελείται από τα εξής στάδια :

1. Το θαλασσινό νερό κατά την είσοδό του στην διάταξη προκατεργασίας περνά από ένα φίλτρο που παρεμποδίζεται η ταυτόχρονη είσοδος θαλάσσιων οργανισμών και αντικειμένων.
2. Το νερό προς κατεργασία αποθηκεύεται σε δεξαμενή κατάλληλου όγκου, ώστε να εξασφαλίζεται η καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων και να διασφαλίζεται ο απαραίτητος χρόνος επαφής για απολύμανση. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η δεξαμενή πρέπει να είναι κατάλληλο έτσι ώστε να μην επηρεάζει την ποιότητα του νερού. Το νερό θα παραμείνει στην δεξαμενή για τουλάχιστον 20 λεπτά μέχρι να αρχίσει η επεξεργασία του. Ταυτόχρονα ελέγχεται μέσω κατάλληλου αυτοματισμού η στάθμη της δεξαμενής, έτσι ώστε να προστατεύονται οι αντλίες τροφοδοσίας από την ξηρή λειτουργία.
3. Έπειτα πραγματοποιείται απολύμανση (προχλωρίωση) με χρήση χλωρίου που έχει ως στόχο την πρόληψη δημιουργίας επικαθίσεων μόλυνσης οργανικής κυρίως προέλευσης. Το προς αφαλάτωση νερό χλωριώνεται συνήθως με υποχλωριώδες νάτριο. Η χλωρίωση γίνεται με δοσομετρικές αντλίες συνεχόμενα ώστε στο νερό τροφοδοσίας η συγκέντρωση σε ελεύθερο υπολειμματικό χλώριο να κυμαίνεται από 1 έως 10 ppm. Η διαδικασία αυτή προστατεύει τις μεμβράνες από πρόωρη φθορά.
4. Στην συνέχεια, (και εφόσον η συγκεκριμένη τεχνική κριθεί αναγκαία από τον μελετητή – εγκαταστάτη της μονάδας) για τις περιπτώσεις όπου το ακατέργαστο νερό έχει υψηλό ποσοστό αιωρούμενων σωματιδίων, χρησιμοποιούνται ουσίες που προκαλούν την κροκίδωση, συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών και τελικά τον διαχωρισμό τους από το νερό προς επεξεργασία σε επόμενο στάδιο. Ιδιαίτερα όμως στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται χημικά μέσα κροκίδωσης πρέπει να δοθεί πολύ μεγάλη προσοχή στην δοσομέτρησή τους, διότι όπως έχει παρατηρηθεί προκαλούν φαινόμενα έμφραξης των μεμβρανών λόγω της ασυμβατότητάς τους με τα αντικαθαλατωτικά που χρησιμοποιούνται σε επόμενο στάδιο.

5. Επόμενο στάδιο της προκατεργασίας είναι η διήθηση του ακατέργαστου νερού σε πολυστρωματικά φίλτρα τα οποία περιέχουν αδρανή υλικά σε στρώματα. Σκοπός αυτού είναι να γίνει κατακράτηση της άμμου, λάσπης, των βαρέων μετάλλων και της οργανικής ύλης. Το πιο σύνηθες υλικό πλήρωσης των πολυστρωματικών φίλτρων είναι η άμμος σε διάφορες κοκκομετρίες και αποτελούνται από δύο στρώματα εκ των οποίων το χαμηλότερο αποτελείται από άμμο με μέγεθος κόκκων 0.4-0.8mm ενώ το υψηλότερο από 0.8-2.5mm. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η επιβράδυνση του ρυθμού ανάπτυξης πτώσης πίεσης στο φίλτρο και επιμηκύνεται η περίοδος ως την επόμενη έκπλυση του. Τα φίλτρα αυτά περιλαμβάνουν τις κατάλληλες σωληνώσεις και βαλβίδες ώστε να είναι δυνατή (είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα) η έκπλυση τους (backwash)



Εικόνα 2-3 Πολυστρωματικά φίλτρα ταχείας διήθησης

Πηγή : <https://www.watera.gr/filtration/>

6. Επόμενο στάδιο της προκατεργασίας είναι η αποχλωρίωση. Ειδικότερα για τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης λεπτού υμένα πολυαμιδίου (thin film polyamide) που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για την παραγωγή πόσιμου νερού από θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό μετά από χλωρίωση του ακατέργαστου νερού είναι απολύτως απαραίτητη η αποχλωρίωσή του για την προστασία των μεμβρανών από οξείδωση. Η πιο συνηθισμένη λύση

αποχλωρίωσης είναι η δοσομέτρηση αναγωγικών μέσων κατάλληλης δοσολογίας ώστε να μην υπάρχει καμία περίπτωση να παραμείνει χλώριο στο διάλυμα. Περισσότερο ενδεδειγμένη μέθοδος είναι η αποχλωρίωση με χρήση φίλτρων με υλικό πλήρωσης ενεργό άνθρακα. Τα φίλτρα αυτά συγκρατούν επίσης αιωρούμενη οργανική ύλη και χλωραμίνες που είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες. Για τις εφαρμογές με ανοικτή αναρρόφηση από θάλασσα είναι ιδιαίτερα θετική επίσης η ιδιότητα του ενεργού άνθρακα να συγκρατεί έλαια (υδρογονάνθρακες ή σιλικονούχα) και λίπη προστατεύοντας τις μεμβράνες. Σύμφωνα με οδηγίες του κατασκευαστή των μεμβρανών σε περίπτωση που υπάρχει συγκέντρωση τους άνω του 0.1 mg/L απαιτούνται μέτρα καθώς προκαλούν έμφραξη των μεμβρανών.

7. Για την αποφυγή επικαθίσεων αλάτων αποτελούσε πάγια τακτική η χρήση οξέων για τη μείωση του pH του διαλύματος, ιδιαίτερα πριν από την εξέλιξη αξιόπιστων αντικαθαλατωτικών χημικών για την αντίστροφη ώσμωση. Τα οξέα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το θειικό και δευτερευόντως το υδροχλωρικό οξύ. Η δοσολογία τους καθορίζεται από τη σύσταση του κατεργαζόμενου νερού.
8. Η παραπάνω τεχνική προκατεργασίας αν και συνηθίζεται δεν πρέπει να αντικαθιστά την προσθήκη αντικαθαλατωτικών ουσιών που παρεμποδίζουν την επικάθηση αλάτων. Οι απαιτούμενες ποσότητες αντικαθαλατωτικού είναι συνήθως της τάξης των 2 - 5 ml / m³ ακατέργαστου νερού. Η δράση τους οφείλεται στο γεγονός ότι προσροφώνται επιφανειακά στο αρχικό στάδιο σχηματισμού των αλάτων, έτσι ώστε να μην επιτρέπουν την ανάπτυξη των κρυστάλλων και συνεπώς το σχηματισμό επικαθίσεων αλάτων. Τα αντικαθαλατωτικά χημικά πρακτικά επιτρέπουν τη σημαντική αύξηση του βαθμού ανάκτησης παραγόμενου νερού προς ακατέργαστο. Χρησιμοποιούνται στην συντριπτική πλειονότητα των μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και η επιλογή του καταλληλότερου καθώς και η βέλτιστη δοσομέτρηση του γίνεται μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων που παρέχουν οι κατασκευαστές των αντικαθαλατωτικών.
9. Για την ολοκλήρωση της προκατεργασίας, το νερό τροφοδοσίας (θαλασσινό ή υφάλμυρο) διέρχεται από φίλτρα φυσιγγίων ή σάκκου. Ο αριθμός και οι διαστάσεις των φυσιγγίων που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από την παροχή τροφοδοσίας. Γενικά χρησιμοποιούνται φίλτρα από πολυμερές υλικό. Το δοχείο στο οποίο τοποθετούνται τα φυσιγγία θα πρέπει να είναι από ανοξείδωτο υλικό κατάλληλης αντοχής στη διάβρωση του ακατέργαστου νερού ή ιδανικά από πολυμερή υλικά κατάλληλης αντοχής σε πίεση. Ειδικά όταν το ακατέργαστο νερό είναι θαλασσινό άρα έντονα διαβρωτικό ενδείκνυται σαφώς η αποφυγή μεταλλικών φίλτρων και η χρήση φίλτρων από σύνθετα πολυμερή που έχουν άριστη αντοχή στη διάβρωση σε συνδυασμό με καλή αντοχή σε πίεση λειτουργίας (έως και 10 bar) για ένα σημαντικό εύρος μεγεθών. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα φίλτρα είναι από χάλυβα επενδυμένο εσωτερικά με κατάλληλη επίστρωση ανθεκτική στη διάβρωση που αποτελεί την οικονομικότερη λύση, χαμηλότερης όμως αξιοπιστίας. Παρόλο που η επίστρωση (ή επικάλυψη) τέτοιου τύπου έχει πολύ καλή χημική αντοχή στο θαλασσινό νερό, σε περίπτωση που λόγω κακής εφαρμογής της επικάλυψης ή ρευστομηχανικής διάβρωσης

αποκαλυφθεί σε κάποιο σημείο το χαλύβδινο τμήμα, θα υπάρξει πρόβλημα εξαιρετικά σύντομα.

2.4 Κύρια Διεργασία

2.4.1 Μεμβράνες Αντίστροφης ώσμωσης

Όπως προκύπτει και από την παραπάνω ανάλυση της μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, το κυριότερο τμήμα της είναι οι μεμβράνες και στην πραγματικότητα η προκατεργασία έχει ως βασικό της στόχο την προστασία των μεμβρανών από πρόωρη φθορά.

Ο πρωταρχικός ρόλος μιας μεμβράνης είναι να ενεργεί ως ένα εκλεκτικό φράγμα (selective barrier). Επιτρέπει τη διέλευση ορισμένων συστατικών και συγκρατεί άλλα συστατικά ενός διαλύματος. Συνεπώς το διερχόμενο ρεύμα ή η συγκρατούμενη φάση εμπλουτίζεται σε ένα ή περισσότερα συστατικά. Στην ευρύτερη έννοια της η μεμβράνη θα μπορούσε να οριστεί ως μια «περιοχή ασυνέχειας παρεμβαλλόμενη ανάμεσα σε δύο φάσεις» [S.T.Hwang, 1984] ή ως «μια διακριτή, λεπτή, διεπιφάνεια η οποία τροποποιεί τη διέλευση χημικών ειδών, τα οποία έρχονται σε επαφή μαζί της». Αυτή η διεπιφάνεια μπορεί να είναι μοριακά ομοιογενής, δηλαδή εντελώς ομοιόμορφη στη σύνθεση και στη δομή, ή χημικώς ή φυσικώς ετερογενής, δηλαδή να περιέχει πόρους πεπερασμένων διαστάσεων ή να αποτελείται από κάποια μορφή στρωματοποιημένης δομής» [R.Baker, 2004].

Οι μεμβράνες οι οποίες θεωρούνται κατάλληλες για την μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης πρέπει να έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Μεγάλη απόρριψη αλάτων με υψηλή διαπερατότητα διαλύτη.
- Ικανότητα να σχηματίζει λεπτά διαχωριστικά στρώματα μεγάλης αντοχής (ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία πολλαπλών στρώσεων – τυλιγμάτων όπως στις μεμβράνες σπειροειδούς διαμόρφωσης)
- Ικανότητα κατασκευής με μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο.
- Μεγάλο εύρος λειτουργικών παραμέτρων, πίεσης, θερμοκρασίας και είδους διαλύματος τροφοδοσίας.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης κυμαίνεται από 3-5 χρόνια, εξαρτώμενη από την ποιότητα του νερού προς επεξεργασία και τον τρόπο χρήσης και καθαρισμού.
- Μεγάλη αντοχή στην προσβολή από χημικές ενώσεις και μικροοργανισμούς.
- Ικανότητα λειτουργίας και ιδιαίτερα διενέργειας χημικού καθαρισμού της σε μεγάλο εύρος pH.

Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης ήταν η **οξική κυτταρίνη** από τους Loeb και Sourirajan το 1960. Οι μεμβράνες από οξική κυτταρίνη ήταν ασύμμετρες που σημαίνει ότι αποτελούνται από δύο διαφορετικά στρώματα του ίδιου υλικού και χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον μεταξύ του 1960 και του 1980. Οι ιδιότητες των μεμβρανών οξικής κυτταρίνης ήταν σημαντικές κυρίως για εφαρμογές υπερδιήθησης.

Λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης από οξική κυτταρίνη, έγιναν προσπάθειες χρησιμοποίησης και άλλων υλικών, αφενός για να βελτιωθεί η απόδοση τους και αφετέρου για να μειωθεί το κόστος τους. Μέχρι και σήμερα ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται τα πολυμερή υλικά και κυρίως τα **αρωματικά πολυαμίδια** και οι **πολυσουλφόνες**.

Όσον αφορά τα αρωματικά πολυαμίδια παρατηρείται ότι λειτουργούν σε μεγάλο εύρος pH (4-10), έχουν θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας μέχρι και τους 50°C και δεν υδρολύονται και δεν καταστρέφονται από μικροοργανισμούς. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν ευαισθησία στο χλώριο και σε άλλα οξειδωτικά με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερη τάση έμφραξης.

Οι πολυσουλφόνες χρησιμοποιούνται κυρίως ως υλικά των μεμβρανών υπερδιήθησης ή ως ενδιάμεσο στρώμα σε μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης από σύνθετα υλικά. Παρουσιάζουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας (έως και 75°C), ευρεία περιοχή pH (1-13), καλή αντοχή σε χλώριο και εύκολη κατασκευή.

Τα τελευταία χρόνια έχουν επικρατήσει στο εμπόριο, για τις μονάδες της αντίστροφης ώσμωσης, μεμβράνες από σύνθετα υλικά αποτελούμενες από αρωματικά πολυαμίδια και πολυσουλφόνες, συνδυάζοντας έτσι βελτιωμένη ανθεκτικότητα στα χημικά και την εκλεκτικότητα. Οι μεμβράνες αυτές αποτελούνται από δύο διακεκριμένες στοιβάδες, τον υμένα (skin), που είναι το δραστικό τμήμα της μεμβράνης για τον διαχωρισμό του νερού από τα διαλυμένα ή αιωρούμενα συστατικά και από ένα λεπτό στρώμα πορώδους υλικού το οποίο είναι περατό τόσο από το νερό όσο και από τα υπόλοιπα συστατικά που περιέχονται σε αυτό. Κατασκευάζονται από οργανικές πολυμερείς ενώσεις και είναι τόσο λεπτές και εύθραυστες, ώστε απαιτείται η μορφοποίηση τους (με την βοήθεια διαφόρων στηριγμάτων), σε μονάδες οι οποίες ονομάζονται στοιχεία μεμβρανών (modules).

Οι μεμβράνες πολυεστέρα-πολυσουλφόνης-πολυαμιδίου συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των υλικών που τα συνθέτουν, δηλαδή έχουν υψηλή εκλεκτικότητα, καλή αντοχή στις μεταβολές του pH και καλές μηχανικές αντοχές. Ωστόσο, είναι αρκετά ευαίσθητες σε οξειδωτικά όπως το χλώριο και λόγω της τραχύτητας των επιφανειών τους είναι ευάλωτες στην έμφραξη, ιδιαιτέρως αυτές που προκαλούνται από μικροοργανισμούς (biofouling).

Τα στοιχεία μεμβρανών διαφοροποιούνται επίσης και από την διαμόρφωσή τους. Από το 1960 μέχρι σήμερα έχουν δοκιμαστεί διάφορες διαμορφώσεις οι οποίες αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω :

- Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών (Tubular membrane module)
- Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών (Plate and frame membrane modules)
- Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (Hollow fiber membrane modules)
- Στοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης ή σπειροειδούς διαμόρφωσης (Spiral wound membrane modules).

Οι δύο τελευταίοι τύποι είναι και οι πιο συνηθισμένοι σε μονάδες αντίστροφης ώσμωσης. Δεδομένου επίσης, της σημασίας του λόγου επιφάνειας ανά μονάδα όγκου της μεμβράνης, οι μεμβράνες κατατάσσονται ως εξής:

- Κυλινδρική 335m²/m³ (Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών)
- Επίπεδη 165 m²/m³ (Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών)

- Σπειροειδούς διαμόρφωσης 1.000 m²/m³
- Λεπτών κοίλων ινών 16.500 m²/m³

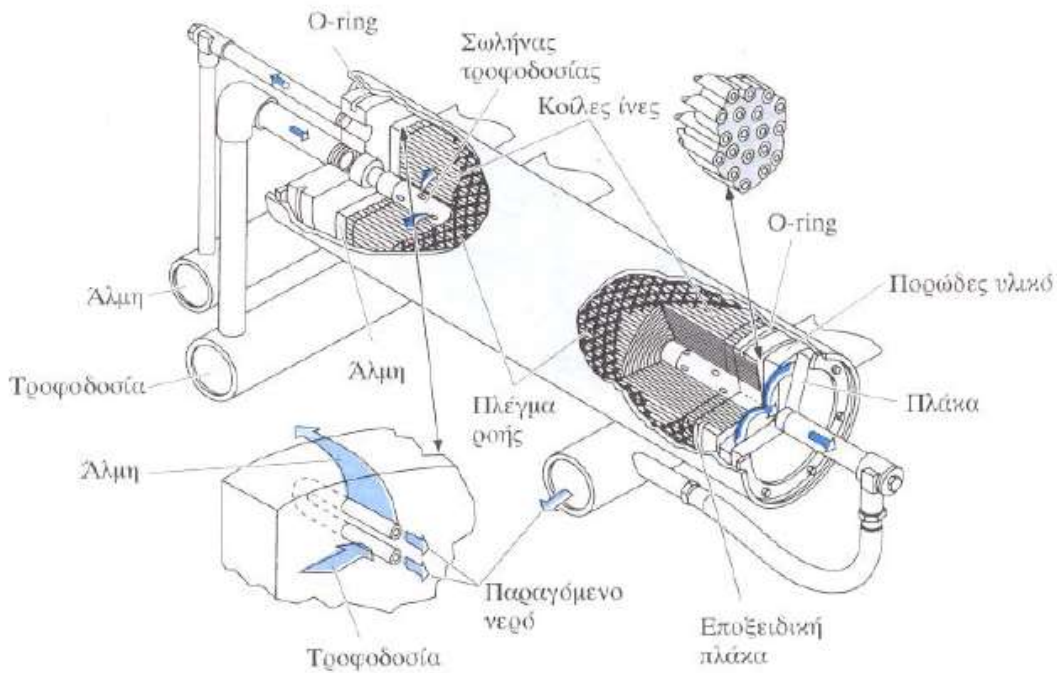
2.4.1.1. Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (Hollow fiber membrane modules)

Οι πρώτες εμπορικές μεμβράνες αφαλάτωσης κατασκευάστηκαν υπό μορφή κοίλων ινών. Οι μεμβράνες αυτές θεωρούνται ως σωλήνες μεγάλου πάχους τοιχωμάτων και πολύ μικρού μεγέθους που δεν χρειάζονται καμία υποστήριξη. Οι λεπτές κοίλες ίνες μπορούν να θεωρηθούν ως μικροί αγωγοί, η διάμετρος των οποίων είναι συγκρίσιμη με αυτή της ανθρώπινης τρίχας. Έτσι π.χ σε ένα σωλήνα διαμέτρου 100 mm (4'') είναι δυνατόν να χωρέσουν ένα εκατομμύριο κοίλες ίνες με εσωτερική διάμετρο 42 μm και εξωτερική 85 μm. Το υλικό κατασκευής τους είναι το πολυαμίδιο, και η διαμόρφωση του είναι ασύμμετρη. Στην εξωτερική επιφάνεια έχουν ένα λεπτό και ανθεκτικό υμένα πάχους <1 μm, που επιτρέπει τη διέλευση του νερού απορρίπτοντας τα συστατικά που περιέχει. Κάτω από τον ανθεκτικό υμένα το υλικό της ίνας είναι πορώδες, για να διευκολύνει τη ροή του νερού προς το εσωτερικό της. Για την μορφοποίηση των κοίλων ινών σε στοιχεία μεμβράνης κάμπτονται στο μέσον για να σχηματίσουν σχήμα U ενώ σχηματίζουν δέσμη διατασσόμενες παράλληλα με το κεκαμμένο άκρο τους βυθισμένο μέσα σε ειδική ρητίνη. Ένας μεγάλος αριθμός ινών συγκεντρώνεται σε μια δέσμη για να διαμορφώσει πρακτικά ένα συλλέκτη του διηθήματος (permeator).

Το διάλυμα τροφοδοσίας αντλείται μέσα από τη μία πλευρά της ίνας, και το αφαλατωμένο νερό αναδύεται μέσω του τοιχώματος των μεμβρανών της ίνας, και η άλμη βγαίνει από το άλλο τέλος της ίνας. Το αλατούχο διάλυμα κινείται κάθετα προς τις κοίλες ίνες υπό υψηλή πίεση. Λόγω της ασκούμενης πίεσης το νερό εισέρχεται στο εσωτερικό των κοίλων ινών που αποτελούν τις ασύμμετρες μεμβράνες και κινείται κατά μήκος τους εξερχόμενο από το ανοιχτό άκρο τους που βρίσκεται σε ειδικό πορώδες υλικό. Το όλο σύστημα τοποθετείται σε ειδικό δοχείο πίεσης και έτσι διαμορφώνεται το στοιχείο αντίστροφης ώσμωσης (Σχήμα 2.6).

Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης θεωρείται το μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας μεμβράνης ανά δεδομένο όγκο, επιτρέποντας τη χρήση υλικών για μεμβράνη ακόμη και με σχετικά μικρό συντελεστή διαπερατότητας σε νερό. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι η διαμόρφωση τους επιτρέπει την εύκολη συσσώρευση των αιωρούμενων συστατικών του διαλύματος τροφοδοσίας με αποτέλεσμα να θεωρούνται ευάλωτες σε μόλυνση – έμφραξη τους.

Η εμπορική τους χρήση περιορίζεται σε εφαρμογές υπερδιήθησης, όπου χρησιμοποιούνται υλικά μεμβρανών ανθεκτικά σε οξειδωτικά μέσα απολύμανσης, ενώ με την έκπλυσή τους αντιμετωπίζεται το πρόβλημα εμφράξεων τους.



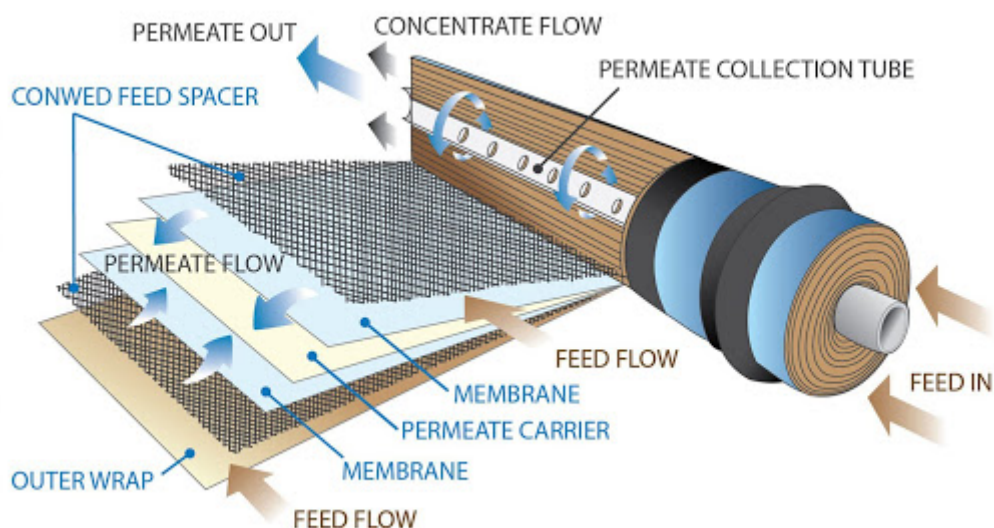
Εικόνα 2-4 Μемβράνες κοίλων ιών (Tubular fiber membrane modules)

Πηγή : Δ. Καπνιστής, Μελέτη μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και χρήση αιολικής ενέργειας στην Άνδρο, 2017

2.4.1.2. Στοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης ή σπειροειδούς διαμόρφωσης (Spiral wound membrane modules)

Τα στοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης αποτελούν την πλέον κυρίαρχη εμπορική εφαρμογή για τις μονάδες αφαλάτωσης. Στη διαμόρφωση αυτή δύο επίπεδα στοιχεία μεμβρανών τοποθετούνται το ένα απέναντι από το άλλο με τις ενεργές επιφάνειές τους στην εξωτερική πλευρά. Μεταξύ των μεμβρανών τοποθετείται πορώδες πολυμερές υλικό. Οι τρεις πλευρές συγκολλούνται ενώ η τέταρτη παραμένει ανοιχτή σχηματίζοντας ένα φάκελο. Εδώ η μεμβράνη είναι σε μορφή φύλλου και δίνει την αίσθηση δύσκαμπτου χαρτιού. Δύο φύλλα διαμορφώνουν ένα σάντουιτς με ένα στρώμα διαστήματος πλέγματος στη μέση. Το πορώδες φύλλο τοποθετείται έτσι ώστε οι μεμβράνες να μην έρχονται σε επαφή όταν ασκείται υψηλή πίεση και επιτρέπει στο παραγόμενο νερό να κινείται στο εσωτερικό των μεμβρανών προς το ανοιχτό άκρο του φακέλου. Το ανοιχτό άκρο του φακέλου συγκολλείται στον σωλήνα συλλογής του παραγόμενου νερού. Ο σωλήνας αυτός είναι διάτρητος στα σημεία που βρίσκονται εντός του φακέλου των μεμβρανών, έτσι ώστε το παραγόμενο νερό να εισέρχεται σε αυτόν και εξέρχεται από το άκρο του σωλήνα. Ο φάκελος τυλίγεται γύρω από το σωλήνα συλλογής μαζί με ειδικό πολυμερές πλέγμα, σχηματίζοντας την σπειροειδή περιέλιξη. Το πλέγμα δημιουργεί τον κατάλληλο χώρο μεταξύ των μεμβρανών ώστε να μπορεί να κινείται το αλατούχο διάλυμα, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί στροβίλους, εμποδίζοντας τον

σχηματισμό στρωτής ροής, (Εικόνα 2-5) Με αυτό τον τρόπο μειώνονται τα ανεπιθύμητα φαινόμενα της έμφραξης (fouling) και της πόλωσης συγκέντρωσης.



Εικόνα 2-5 Στοιχείο μεμβράνης ελικοειδούς περιέλιξης (spiral wound membrane module)

Πηγή : <https://www.plasticscreenmesh.com/product/feed-spacer.html>

Το αλατούχο διάλυμα κινείται αξονικά κατά μήκος του σωλήνα συλλογής, ενώ το παραγόμενο νερό εισέρχεται εγκάρσια στο εσωτερικό του φακέλου, κινούμενο σπειροειδώς μέχρις ότου φτάσει στον σωλήνα συλλογής από το άκρο του οποίου εξέρχεται.

Για την επίτευξη των επιθυμητών παροχών αφαλατωμένου νερού εγκαθίστανται ένα ή συνήθως περισσότερα στοιχεία μεμβρανών σε σειρά εντός των δοχείων πίεσης σχηματίζοντας ένα σύστημα ή μία συστοιχία μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας των παραπάνω φτάνει έως και τα 84 bar για αφαλάτωση θαλασσινού νερού και περίπου τα 41 bar για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού. Με την ως άνω διαμόρφωση των στοιχείων μεμβρανών επιτυγχάνεται πολύ υψηλός λόγος επιφάνειας προς όγκο.

2.5 Μαθηματικά μοντέλα συμπεριφοράς επιπέδων μεμβρανών

Για την εξήγηση του φαινομένου της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και του τρόπου που αυτή γίνεται μέσω των μεμβρανών έχουν αναπτυχθεί διάφορες θεωρίες.

Οι θεωρίες αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Στις δομικές θεωρίες που προσπαθούν να συνδέσουν τη δομή των μεμβρανών με τις απορριπτικές ιδιότητές τους στα άλατα. Οι θεωρίες αυτές μπορούν να

οδηγήσουν μόνο σε ποιοτικά συμπεράσματα, διότι η μαθηματική επεξεργασία τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Στις φαινομενολογικές θεωρίες, όπου γίνεται προσπάθεια σύνδεσης των ιδιοτήτων απόρριψης των μεμβρανών με μετρήσιμες μακροσκοπικές ιδιότητες τους. Αν και η προσέγγιση αυτή δεν παρέχει καμία πληροφορία για τις μικροσκοπικές ιδιότητες και τον μηχανισμό αφαλάτωσης, είναι πολύ χρήσιμες για την διατύπωση σχέσεων που περιγράφουν την συμπεριφορά των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης. Επίσης μπορούν να χρησιμεύσουν στην εξέταση παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την διεργασία της αφαλάτωσης. Οι κυριαρχούσες θεωρίες αυτής της κατηγορίας είναι τρεις. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται οι βασικές αρχές και συμπεράσματα των θεωριών αυτών.

2.5.1 Μοντέλο επιλεκτικής απορρόφησης τριχοειδούς ροής

Με τον όρο επιλεκτική απορρόφηση νοείται η δημιουργία ενός στρώματος νερού στην επιφάνεια της μεμβράνης λόγω των ιδιοτήτων της τελευταίας να απορρίπτει τα ιόντα άλατος που βρίσκονται στο νερό. Κατά αυτόν τον τρόπο παρεμποδίζεται η μεταφορά άλατος διαμέσου της μεμβράνης και το στρώμα του νερού διαπερνά την μεμβράνη μέσω των τριχοειδών σωληνίσκων και της υψηλής πίεσης που ασκείται.

Η μεταφορά των αλάτων μέσω της μεμβράνης γίνεται μέσω του μηχανισμού της διάχυσης και η ταχύτητα διάδοσης του νερού και των αλάτων εξαρτάται από, το είδος της μεμβράνης που χρησιμοποιείται, από την ταχύτητα διάχυσης των ιόντων των αλάτων και την ασκούμενη πίεση.

Επομένως η ροή νερού εκφράζεται από τον τύπο:

$$J = B(\Delta p - \Delta \pi)$$

όπου:

J =η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης

B =η διαπερατότητα του καθαρού νερού

Δp =η διαφορά πίεσης ανάμεσα στην μεμβράνη

$\Delta \pi$ =η διαφορά ωσμωτικής πίεσης ανάμεσα στην μεμβράνη

Ενώ η ροή αλάτων εκφράζεται από τον τύπο:

$$J_2 = \frac{c_m \times k_{di} \times D_{im}}{\delta_m} \times (x_{im} - x_{ip})$$

όπου:

J_2 =η παροχή μάζας των αλάτων ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης

c_m =η μοριακή συγκέντρωση των αλάτων

k_{di} =ο συντελεστής κατανομής του διαλύτη για το συστατικό i (αλάτι)

D_{im} =ο συντελεστής διάχυσης του είδους i (αλάτι)

δ_{μ} = το πάχος της μεμβράνης

x_{im} = το γραμμομοριακό κλάσμα του διαλυμένου άλατος στην μεμβράνη

x_{ip} = το γραμμομοριακό κλάσμα του διαλυμένου άλατος μετά την μεμβράνη

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας, αρχικά μειώνεται η ταχύτητα διόδου του νερού (J), αφού η απαιτούμενη ωσμωτική πίεση που πρέπει να ασκηθεί στο σύστημα είναι μεγαλύτερη, ενώ η ταχύτητα διόδου των αλάτων (J_2) αντίστοιχα αυξάνεται.

2.5.2 Μοντέλο θερμοδυναμικής μη αντιστρεπτών διεργασιών

Το μοντέλο της θερμοδυναμικής μη αντιστρεπτών διεργασιών σε ένα σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η εντροπία του συστήματος αυξάνεται και εκλύεται ενέργεια. Το μοντέλο αυτό, το οποίο δημιουργήθηκε από τους Kedem και Katchalsky, έχει τις παρακάτω βασικές εξισώσεις για την ροή νερού και άλατος.

$$J_V = L_p(\Delta p - \sigma \times \Delta \pi)$$

και

$$J_S = J_V \times C_p = B \times \Delta c + c(1 - \sigma) \times J_V$$

όπου:

J_V : η ογκομετρική παροχή δια μέσου της μεμβράνης ($L/m^2 \cdot \text{day}$)

L_p : η υδραυλική διαπερατότητα της μεμβράνης

Δp : η διαφορά της ασκούμενης πίεσης ανάμεσα στο διάλυμα τροφοδοσίας και του παραγόμενου νερού

$\Delta \pi$: η διαφορά της οσμωτικής πίεσης ανάμεσα στο διάλυμα τροφοδοσίας και του παραγόμενου νερού

σ : ο συντελεστής ανάκλασης που αποτελεί μέτρο επιλεκτικότητας της μεμβράνης και παίρνει τιμές από 0-1 ($\sigma=1$ εάν έχει 100% απόρριψη αλάτων)

J_S : η παροχή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας των διαλυμένων αλάτων δια μέσου της μεμβράνης

B : ο συντελεστής διαπερατότητας των αλάτων

c^* : ο αριθμητικός μέσος των συγκεντρώσεων C_p και C_w

C_p : η συγκέντρωση των αλάτων στο παραγόμενο νερό

C_w : η συγκέντρωση των αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης

Δc : η διαφορά της συγκέντρωσης των αλάτων ($\Delta c = C_w - C_p$)

2.5.3 Μοντέλο διάλυσης – διάχυσης

Το μοντέλο διάλυσης – διάχυσης προτάθηκε αρχικά από τους Lonsdale, Merten και Riley. Δεδομένου ότι από τις αναλύσεις των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης δεν προκύπτει πορώδης επιφάνεια οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ροή διαλύτη (νερό) και διαλυμένης ουσίας (άλας) δεν γίνεται ελεύθερα στην επιφάνεια της μεμβράνης.

Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο λοιπόν, η διαδικασία αρχικά περιγράφεται με την διάλυση του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας στην δραστική επιφάνεια της μεμβράνης και στην συνέχεια διέρχονται από το άλλο άκρο της, μέσω του πορώδους υποστρώματός της. Οι ταχύτητες διάλυσης και διάχυσης του διαλύτη και της διαλυμένης ουσίας είναι διαφορετικός έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός νερού και άλατος. Σύμφωνα με τα παραπάνω η σχέση που περιγράφει την παροχή μάζας του διαλύτη ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης – νερού είναι :

$$J_1 = k_1 \times (\Delta p - \Delta \pi)$$

όπου :

J_1 =η παροχή μάζας του νερού ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$)

k_1 =ο συντελεστής διαπερατότητας του νερού (s/m)

Δp =η διαφορά πίεσης μεταξύ του νερού τροφοδοσίας και του παραγόμενου νερού (Pa)

$\Delta \pi$ =η διαφορά της ωσμωτικής πίεσης μεταξύ του νερού τροφοδοσίας και του παραγόμενου νερού (Pa)

Επίσης η παροχή μάζας των αλάτων ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης δίνεται από τον τύπο:

$$J_2 = k_2 \times (c_f - c_p) \quad (1)$$

όπου :

J_2 =η παροχή μάζας του άλατος ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης ($\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$)

k_2 =ο συντελεστής διαπερατότητας των αλάτων (s/m)

c_f =η συγκέντρωση των αλάτων στο διάλυμα τροφοδοσίας (kg/m^3)

c_p =η συγκέντρωση των αλάτων στο παραγόμενο νερό (kg/m^3)

Η σχέση που συνδέει την μαζική παροχή του νερού και του άλατος ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης είναι :

$$J_2 = J \times c_f \quad (2)$$

και συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει η σχέση της απόρριψης που είναι :

$$Rejection(Απόρριψη) = \frac{J}{k_2 + J} \quad (3)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ογκομετρική παροχή του παραγόμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης δίνεται από τον τύπο :

$$J_1 = \frac{k_1}{\rho} \times (\Delta p - \Delta \pi) \quad (4)$$

και συνδυάζοντας την σχέση (4) με την (3) προκύπτει η απόρριψη συναρτήσει της πίεσης :

$$Rejection(Απόρριψη) = \frac{\frac{k_1}{\rho} \times (\Delta p - \Delta \pi)}{k_2 + \frac{k_1}{\rho} (\Delta p - \Delta \pi)} \quad (5)$$

Η παραπάνω εξίσωση επιβεβαιώνει τον θεμελιώδη κανόνα της διεργασίας της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, που δεν είναι άλλος από το γεγονός ότι αυξανόμενης της ασκούμενης πίεσης η απόρριψη των αλάτων αυξάνεται, και μας ορίζει την απόδοση των μεμβρανών.

Όλα οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για απλές περιπτώσεις επίπεδων μεμβρανών και δεδομένου ότι οι υπόλοιποι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των μεμβρανών (θερμοκρασία, ποσοστό ανάκτησης, συγκέντρωση άλατος στο διάλυμα τροφοδοσίας) παραμένουν σταθεροί. Εφαρμογή της εξίσωσης (4) μπορεί όπως είπαμε να εκφράσει την σχέση της πίεσης με την ογκομετρική παροχή νερού ανά μονάδα επιφάνειας (flux). Παρόλα αυτά, είναι γεγονός ότι όσο αυξάνεται η πίεση στο σύστημα, συμπιέζεται η μεμβράνη με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής διαπερατότητας του νερού. Η παραπάνω αλληλεπίδραση περιγράφεται από την σχέση :

$$k_1 = k_{1,0} \times e^{a_p \times p_f} \quad (7)$$

όπου:

$k_{1,0}$ =η προβολή του συντελεστή διαπερατότητας για ασκούμενη πίεση 0

a_p =σταθερά

p_f =η ασκούμενη πίεση

Οι σχέσεις που περιγράφουν την επίδραση της θερμοκρασίας στον συντελεστή διαπερατότητας του νερού και του άλατος είναι :

$$k_1^T = k_1^0 \times e^{a_T \times \frac{T-T_0}{T_0}} \quad (8)$$

και

$$k_2^T = k_2^0 \times e^{\beta_T \times \frac{T-T_0}{T_0}} \quad (9)$$

όπου:

a_T, β_T = σταθερές, με $\beta_T > a_T$

και οι εκθέτες $0, T$, εκφράζουν τις μεταβλητές στις θερμοκρασίες 0 και T αντίστοιχα.

Τέλος για τον υπολογισμό της ωσμωτικής πίεσης εκτός από την εξίσωση (1) μπορεί να υπολογιστεί και από τον τύπο:

$$\pi = \omega \times c \quad (10)$$

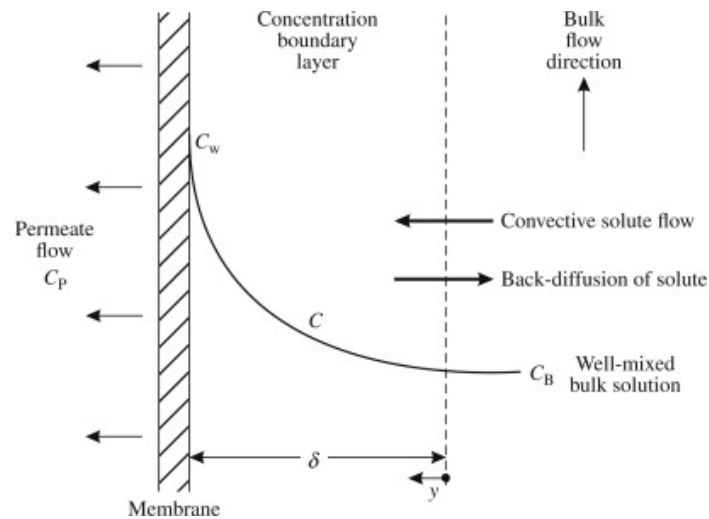
όπου:

ω = ο συντελεστής ωσμωτικής πίεσης, ο οποίος εξαρτάται από την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας και μπορεί να πάρει τιμές $0,711 \cdot 10^5 < \omega < 0,758 \cdot 10^5$ (m^3/kg) για θερμοκρασίες από 20 έως $35^\circ C$.

2.5.4 Το φαινόμενο της πόλωσης συγκέντρωσης

Ένα μοντέλο που περιγράφει πολύ ρεαλιστικά την συμπεριφορά των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης είναι αυτό της πόλωσης συγκέντρωσης. Στην πράξη σε συνθήκες λειτουργίας μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης παρατηρείται το φαινόμενο συγκέντρωσης αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης, καθώς το άλας είναι το συστατικό που απομακρύνει η μεμβράνη ενώ το καθαρό νερό διέρχεται από αυτή. Έτσι σχηματίζεται μια λεπτή στοιβάδα από άλατα μεταξύ της μεμβράνης και της κύριας μάζας του διαλύματος όπου η συγκέντρωση μακριά από αυτή συμβολίζεται με c_f (ελάχιστη), ενώ στην στοιβάδα συμβολίζεται με c_{fw} (μέγιστη).

Αυτό σημαίνει ότι σύμφωνα με τα προηγούμενα μοντέλα, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την τιμή της συγκέντρωσης στην επιφάνεια της μεμβράνης και όχι αυτή στην κύρια μάζα του διαλύματος.



Σχήμα 2-4 Πόλωση συγκέντρωσης σε μεμβράνες RO

Πηγή : Permeate flux inflection due to concentration polarization in crossflow membrane filtration: A novel analytic approach, Albert S. Kim, December 2008

Θεωρώντας ότι επέρχεται δυναμική ισορροπία μεταξύ των αλάτων στην λεπτή στοιβάδα και της κύριας μάζας του διαλύματος η ταχύτητα απόθεσης αλάτων στην στοιβάδα δίνεται από την σχέση :

$$u_1 = J(c_{fz} - c_p)$$

η οποία θα είναι ίση και με την ταχύτητα διάχυσης από την στοιβάδα προς την κύρια μάζα του διαλύματος και η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$u_2 = -D \frac{dc_{fz}}{dz}$$

και με συνδυασμό των δύο παραπάνω εξισώσεων παίρνουμε την μέση ογκομετρική παροχή ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης J:

$$J(c_{fz} - c_p) = -D \frac{dc_{fz}}{dz}$$

όπου:

c_{fz} =η συγκέντρωση των αλάτων του νερού τροφοδοσίας σε απόσταση z από την επιφάνεια της μεμβράνης

c_p =η συγκέντρωση αλάτων του παραγόμενου νερού

D =ο συντελεστής διάχυσης των αλάτων

ολοκληρώνοντας τώρα την παραπάνω σχέση μπορούμε να πάρουμε το πάχος της λεπτής στοιβάδας :

$$J \int_0^\delta dz = -D \int \frac{dc_{fz}}{c_{fz} - c_p} \leftrightarrow \delta = \ln \frac{c_f - c_p}{c_{fz} - c_p} \times \frac{D}{J}$$

ή αλλιώς :

$$\frac{c_f - c_p}{c_{fz} - c_p} = e^{\frac{J \times \delta}{D}} \quad (11)$$

από όπου εξάγεται ο συντελεστής μεταφοράς μάζας

$$k = \frac{D}{\delta}$$

ο οποίος ισχύει θεωρώντας ότι το τοίχωμα της μεμβράνης είναι αδιαπέραστο και έτσι το πάχος, δ , δεν επηρεάζεται από την ροή του νερού τροφοδοσίας.

Επίσης γνωρίζουμε ότι σε μια διεργασία αφαλάτωσης η συγκέντρωση άλατος στο παραγόμενο νερό είναι πολύ μικρότερη από αυτή του νερού τροφοδοσίας η εξίσωση (11) γίνεται :

$$\frac{c_f}{c_{fz}} = e^{\frac{J}{k}}$$

όπου το πρώτο μέρος της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να αναλυθεί υπό μορφή σειράς ως :

$$\frac{c_{fz}}{c_f} = 1 + \frac{J}{k} + \frac{1}{2!} \times \left(\frac{J}{k}\right)^2 + \frac{1}{3!} \times \left(\frac{J}{k}\right)^3 + \dots$$

Σύμφωνα με τον Αυλωνίτη, αν ο όρος J/k είναι μικρότερος της μονάδας η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική (οι όροι πέραν της πρώτης τάξης της παραπάνω σειράς απαλείφονται) και τελικά θα έχουμε :

$$c_{fz} = c_f \times \left(1 + \frac{J}{k}\right) \quad (12)$$

και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας μπορεί να υπολογισθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{k \times d}{D} = 0.023 \times Re^{0.8} \times Sc^{0.33}$$

όπου :

d=η διάμετρος του καναλιού που ρέει το νερό τροφοδοσίας

Re=ο αριθμός Reynolds

Sc=ο αριθμός Schmidt

Τελικά συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4),(10) και (12) παίρνουμε:

$$J = \frac{k \times (k_1 \times \Delta P - k_1 \times \omega \times c_f + k_1 \times \omega \times c_p)}{\rho \times k + k_1 \times \omega \times c_f} \quad (13)$$

και από τις (1),(12) και (13) έχουμε:

$$J_2 = \frac{k \times k_2 \times c_p \times (c_f - c_p)}{k \times c_p - k_2 \times c_f}$$

2.5.5 Μαθηματική ανάλυση μεμβρανών σπειροειδούς περιέλιξης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν αφορούν απλές επίπεδες μεμβράνες, όπου οι συνθήκες της πίεσης, της συγκέντρωσης των αλάτων και της θερμοκρασίας παραμένουν σταθερές. Σε πραγματικές συνθήκες όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει μιας και η πίεση του νερού τροφοδοσίας και η συγκέντρωση άλατος κατά μήκος της μεμβράνης, εκφράζονται από διαφορικές εξισώσεις, αφού μεταβάλλονται ως προς τις δύο κατευθύνσεις του χώρου (αξονική και ακτινική). Συνεπώς οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ογκομετρική παροχή νερού ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης (flux) μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο και τελικά η μαθηματική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των μεμβρανών καθίσταται μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία.

Πράγματι γίνεται αμέσως κατανοητό, μιας και ακόμα και αν η συγκέντρωση άλατος του παραγόμενου νερού θεωρηθεί σταθερή, η συγκέντρωση των αλάτων στην επιφάνεια της μεμβράνης μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο αφενός λόγω της πόλωσης συγκέντρωσης και αφετέρου λόγω της παραγωγής καθαρού νερού κατά μήκος της μεμβράνης που σημαίνει ότι η συγκέντρωση των αλάτων θα αυξάνεται στο διάλυμα τροφοδοσίας κατά τη διεύθυνση της μεμβράνης.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω δεδομένα ο Σ. Αυλωνίτης έχει αναπτύξει ένα πλήρες, αναλυτικό μαθηματικό μοντέλο συμπεριφοράς των μεμβρανών λαμβάνοντας υπόψιν τα παρακάτω:

- Τις πτώσεις πίεσης στα κανάλια τροφοδοσίας και παραγόμενου νερού
- Το φαινόμενο της πόλωσης – συγκέντρωσης
- Τη μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλύματος στην επιφάνεια της μεμβράνης
- Την ισχύ του νόμου του Darcy για τις πτώσεις πίεσης στα κανάλια τροφοδοσίας και παραγόμενου νερού
- Την ισχύ του μοντέλου διάλυσης – διάχυσης
- Την ισχύ του μοντέλου της λεπτής στοιβάδας για την πόλωση συγκέντρωσης
- Σταθερή συγκέντρωση άλατος του παραγόμενου νερού
- Επίπεδες μεμβράνες
- Σταθερές ιδιότητες ρευστών
- Η συγκέντρωση της άλμης αποτελεί γραμμική συνάρτηση της απόστασης κατά μήκος του άξονα X με :

$$c_b = c_f + f \times x$$

όπου:

$$f = \frac{c_b(L) - c_f}{L}$$

με L=το μήκος της μεμβράνης και $c_b(L)$ η συγκέντρωση του εξερχόμενου αλμολοιπού από την μεμβράνη

- Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας δίνεται από την σχέση :

$$\frac{k \times d}{D} = 0.063Sc^{0.17} \times Re^{0.4} \times \left(\frac{c_f}{\rho}\right)^{0.77} \times \left(\frac{p_f}{p_0}\right)^{0.55}$$

με $p_0=1\text{bar}$

- Η ωσμωτική πίεση είναι ανάλογη της συγκέντρωσης

Σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις και εφαρμόζοντας ισοζύγια μάζας και ορμής για το κανάλι τροφοδοσίας και καθαρού νερού προκύπτουν οι δυο βασικές εξισώσεις που περιγράφουν την ογκομετρική παροχή ανά μονάδα επιφάνειας της μεμβράνης του παραγόμενου νερού και των αλάτων και είναι :

$$J = \frac{q \tanh \frac{w}{q}}{\omega f w L} \times \left[(k + k_1 \omega c_f) \times \ln \frac{k + k_1 \omega c_b(L)}{k + k_1 \omega c_f} \times \left[\Delta P_{ef}(0, w) + \frac{k}{k_1} \right] \times \frac{c_f u_f k_{fb} \mu}{f} \times \left[k_1 \omega (c_b(L) - c_f) - k \times \ln \frac{c_b(L)}{c_f} \times \ln \frac{k_1 \omega c_b(L) c_f}{k} - \frac{k_1^2 \omega^2}{4k} \times (c_b^2(L) - c_f^2) \right] \right]$$

όπου

$$J_2 = \frac{k_2}{wL} \times \left[c_f w L + \frac{q \tanh \frac{w}{q}}{k_1 f \omega^2 k} \times [k_1 \omega (c_b(L) - c_f)] \times \left[\Delta P_{ef}(0, w) (k_1 \omega c_f) + \frac{k^2}{k_1} - \frac{k \omega (c_b(L) - c_f)}{2} \right] \times \ln \frac{k + k_1 \omega c_b(L)}{k + k_1 \omega c_f} \right] \left[\Delta P_{ef}(0, w) + \frac{k}{k_1} \right] + \frac{k c_f k_{fb} \mu c_b(L)}{f} \times \ln \frac{k + k_1 \omega c_b(L)}{k} - k_1 \omega c_b(L) + \frac{k_1^2 \omega^2}{4k} \times (c_b^2(L) - c_f^2)$$

όπου,

$$\Delta P_{ef}(\mathbf{0}, w) = \frac{(\Delta P - \omega c_f)k}{k + k_1 \omega c_f}$$

$$q = \sqrt{\frac{h_p}{2k_1 k_f b u}}$$

$$\Delta P = P_f(\mathbf{0}, w) - P_p(\mathbf{0}, w)$$

με :

f, b, p=δείκτες που αναφέρονται στο διάλυμα τροφοδοσίας, στο αλμόλουπο (brine) και στο παραγόμενο νερό (permeate) αντίστοιχα

ω=ο συντελεστής ωσμωτικής πίεσης

k=ο συντελεστής μεταφοράς μάζας του διαλύματος τροφοδοσίας

k₁=ο συντελεστής διαπερατότητας του νερού

k₂=ο συντελεστής διαπερατότητας των αλάτων

C=η συγκέντρωση των αλάτων

C(L)=η συγκέντρωση των αλάτων σε απόσταση L από την είσοδο στην μεμβράνη

2.6 Αντλητικά Συγκροτήματα - Συστήματα Ανάκτησης Ενέργειας

2.6.1 Γενικά - Ορισμός

Με δεδομένο ότι η απαιτούμενη ενέργεια για τη διεργασία της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση παρέχεται από τη συμπίεση του ρεύματος τροφοδοσίας των μεμβρανών, τα αντλητικά συγκροτήματα αποτελούν εξαιρετικά σημαντικό τμήμα όλων των μονάδων αφαλάτωσης. Ειδικά στις μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού όπου η απαιτούμενη πίεση συνήθως κυμαίνεται από 60 – 70 bar, η επιλογή του κατάλληλου αντλητικού συγκροτήματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς η απόδοση και η αντοχή του σε ένα ιδιαίτερα διαβρωτικό υγρό όπως το θαλασσινό νερό επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και την αξιοπιστία ολόκληρης της μονάδας.

Έγινε αναφορά σε αντλητικά συγκροτήματα παρόλο που είναι σύνηθες με τον όρο αντλία για λόγους απλούστευσης να εννοείται το υδραυλικό μέρος και ο κινητήρας. Οι αντλίες είναι τα μηχανικά μέσα που χρησιμοποιούνται για τη διακίνηση ενός

υγρού εντός ενός συστήματος αγωγών και για την ανύψωση της πίεσής του. Η διακίνηση του υγρού γίνεται μέσα από αγωγούς και επιτυγχάνεται με τη δημιουργία διαφοράς πίεσης στις διάφορες πλευρές του κινούμενου στοιχείου της αντλίας. Η κίνηση στο κινούμενο στοιχείο δίνεται από εξωτερική πηγή (ηλεκτροκινητήρα ή μηχανή εσωτερικής καύσης ή τουρμπίνα) με κατάλληλη σύνδεση.

Κατά έναν άλλο ορισμό, η αντλία είναι το μηχανικό μέσο που χρησιμοποιεί διάφορους ενεργειακούς μετασχηματισμούς προκειμένου να αυξήσει την πίεση ενός υγρού [Volk, 2005].

Οι αντλίες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το υλικό κατασκευής τους, με βάση την αρχή λειτουργίας τους, με βάση το είδος των υγρών στα οποία εφαρμόζονται κ.ο.κ.

2.6.2 Υλικά Κατασκευής

Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των διαφόρων τμημάτων των αντλιών είναι χυτοσίδηρος, μπρούντζος, κοινός χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας, τιτάνιο ή κράματα για ειδικές εφαρμογές (π.χ. Hastelloy). Παράλληλα, για ορισμένες εφαρμογές οι αντλίες κατασκευάζονται από πλαστικά ή ακόμα σπανιότερα από σύνθετα πολυμερή υλικά.

Τα λειτουργικά τμήματα των αντλιών αντίστροφης ώσμωσης, όπως π.χ. οι πτερωτές ή τα πιστόνια, είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα υψηλής κραματοποίησης τουλάχιστον AISI 316 για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού.

Για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού χρησιμοποιούνται ανοξείδωτοι χάλυβες υψηλής κραματοποίησης όπως ο AISI 904 (EN 1.4539) ή ο duplex UNS S31803 (EN 1.4462) που παρουσιάζουν καλή αντίσταση στη διάβρωση σε περιβάλλοντα υψηλής συγκέντρωσης χλωριούχων. Ειδικά σε αντλίες όπως οι θετικής εκτόπισης που έχουν μικρότερο μέγεθος και απαιτούν μικρότερη ποσότητα μεταλλικών βρεχόμενων τμημάτων, χρησιμοποιείται και ο ανοξείδωτος χάλυβας super duplex UNS S32750 (EN 110 1.4410) που είναι σημαντικά ακριβότερος στη τιμή του αλλά έχει πολύ καλή αντοχή στη διάβρωση [Olsson, 2007].

2.6.3 Τύπο Αντλιών

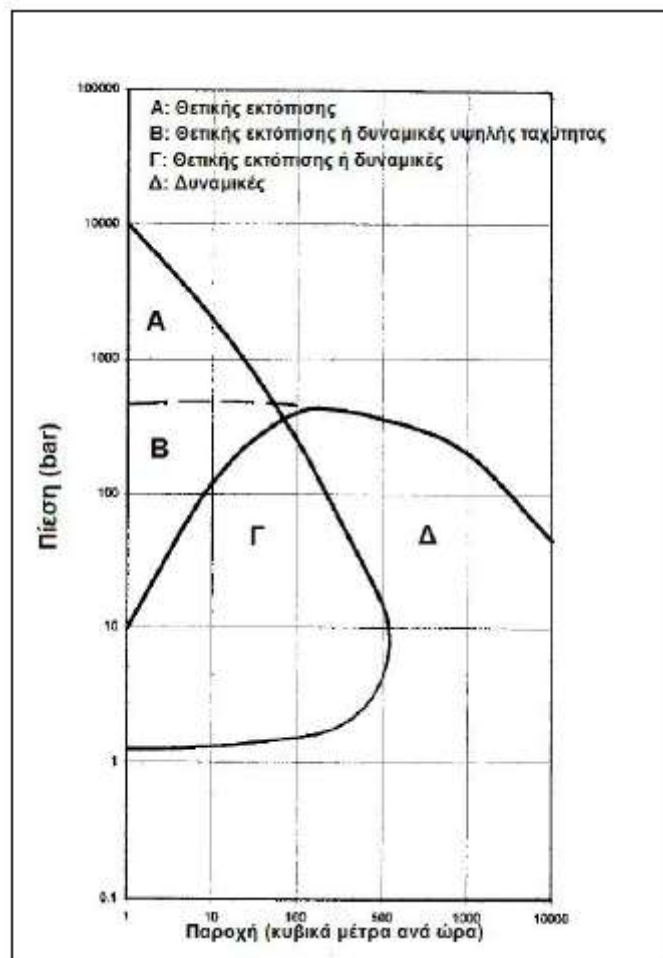
Συνήθως ταξινομούνται με βάση την αρχή λειτουργίας τους και έτσι διακρίνονται σε δυναμικές αντλίες και θετικής εκτόπισης. Στο σχήμα 2.12 φαίνονται οι βασικές κατηγορίες και τα υποσύνολά τους.



Σχήμα 2-5 Κατηγορίες αντλιών κυκλοφορίας

Πηγή : http://blogs.sch.gr/geoparaevan/files/2008/11/65_pumps.pdf

Ανάλογα με το είδος τους οι αντλίες έχουν και διαφορετικές περιοχές λειτουργίας. Στο σχήμα 2.5 φαίνονται ενδεικτικά οι περιοχές λειτουργίας των διαφόρων αντλιών.

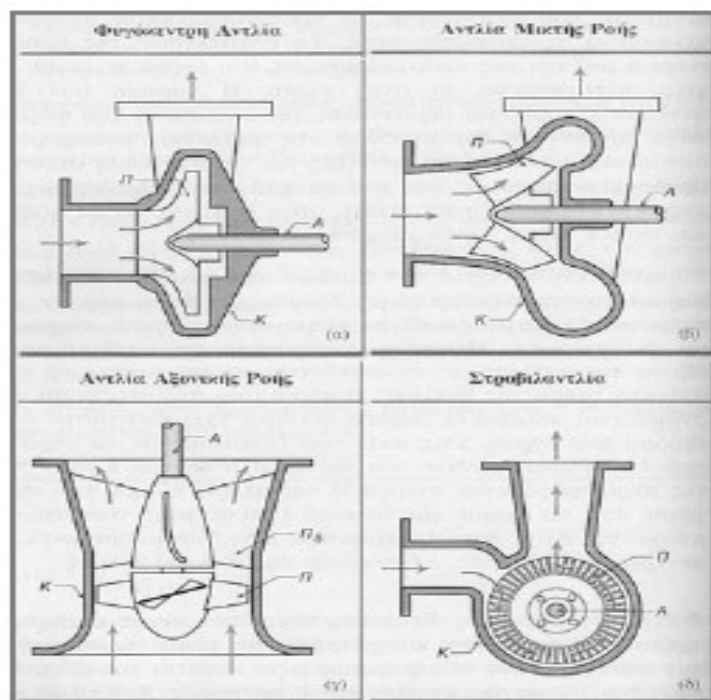


Σχήμα 2-6 Εύρος λειτουργίας τύπων αντλιών

2.6.3.1 Δυναμικές Αντλίες

Στις δυναμικές αντλίες αυξάνεται η ταχύτητα του διακινούμενου υγρού, με μεταφορά ορμής σε αυτό από το κινούμενο στοιχείο της αντλίας. Το αποτέλεσμα της δράσης αυτής είναι η αύξηση της κινητικής ενέργειας του υγρού, η οποία, στη συνέχεια, κατά την έξοδό του από την αντλία, μετατρέπεται σε στατική πίεση. Το κινούμενο στοιχείο των αντλιών αυτών αποτελείται από έναν ή περισσότερους δρομείς οι οποίοι φέρουν χυτά περύγια. Ο δρομέας μαζί με τα περύγια ονομάζεται περωτή. Η περωτή είναι στερεωμένη πάνω στον άξονα της αντλίας, ο οποίος συνδέεται με την κινητήρια μηχανή. Το ακίνητο τμήμα της αντλίας, μέσα στο οποίο περιστρέφεται η περωτή, ονομάζεται κέλυφος (ή σώμα). Το κέλυφος έχει ανοίγματα εισόδου και εξόδου του υγρού. Στις αντλίες του τύπου αυτού, το υγρό οδηγείται από το στόμιο εισόδου του κελύφους στο κέντρο ή στην περιφέρεια της περιστρεφόμενης περωτής. Η περαιτέρω κίνηση του υγρού εξαρτάται από το σχήμα και τον τρόπο τοποθέτησης των περυγίων της περωτής. Έτσι διακρίνουμε τέσσερα είδη δυναμικών αντλιών, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8:

- I. Φυγόκεντρες
- II. Μικτής Ροής
- III. Αξονικής Ροής
- IV. Στροβιλαντλίες



Εικόνα 2-6 Δυναμικές αντλίες : (α) φυγόκεντρη, (β) μικτής ροής, (γ) αξονικής ροής, (δ) στροβιλαντλία

Στις μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, χρησιμοποιούνται κατά συντριπτική πλειοψηφία δυναμικές αντλίες και πιο συγκεκριμένα φυγοκεντρικές αντλίες. Παρακάτω περιγράφονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των δυναμικών αντλιών, που είναι η γενική κατηγορία που συμπεριλαμβάνει και τις φυγοκεντρικές, καθώς και οι χαρακτηριστικές τους καμπύλες.

2.6.3.1.1 Χαρακτηριστικά Μεγέθη Δυναμικών αντλιών

Οι βασικές παράμετροι που περιγράφουν την απόδοση μιας φυγοκεντρικής, και γενικά μιας δυναμικής, αντλίας είναι η παροχή, το ύψος (αναρρόφησης και κατάθλιψης), το ολικό μανομετρικό, η απαιτούμενη ισχύς, ο βαθμός απόδοσης και ο αριθμός στροφών.

Σε ένα σύστημα άντλησης διακρίνουμε το τμήμα της αναρρόφησης, το τμήμα της κατάθλιψης, η πίεση αναρρόφησης, p_a , και η πίεση κατάθλιψης p_k .

Η λειτουργία μιας αντλίας σχετίζεται με τέσσερα χαρακτηριστικά ύψη, το στατικό ύψος αναρρόφησης, το στατικό ύψος κατάθλιψης, το ολικό στατικό ύψος και το ολικό μανομετρικό ύψος.

- **Το ύψος αναρρόφησης, h_a** μιας δυναμικής αντλίας είναι ίσο με το ύψος πίεσης της ροής στην είσοδο της αντλίας. Αν p_a είναι η απόλυτη πίεση αναρρόφησης, ο τύπος που μας δίνει το ύψος αναρρόφησης είναι ο παρακάτω:

$$h_a = \frac{p_a}{\gamma}$$

- **Το ύψος κατάθλιψης h_k** μιας δυναμικής αντλίας είναι ίσο με το ύψος πίεσης της ροής στην κατάθλιψη της αντλίας. Αν p_k είναι η απόλυτη πίεση κατάθλιψης ο τύπος που μας δίνει το ύψος κατάθλιψης είναι ο παρακάτω:

$$h_k = \frac{p_k}{\gamma}$$

- **Το ολικό μανομετρικό ύψος h_p ,** μιας δυναμικής αντλίας είναι ίσο με την αύξηση της ολικής ενέργειας της μονάδας βάρους του υγρού καθώς αυτό διέρχεται από την αντλία. Για ασυμπίεστη ροή το ολικό μανομετρικό ύψος υπολογίζεται με εφαρμογή της εξίσωσης της μηχανικής ενέργειας, υπό την μορφή υψών μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της αντλίας:

$$h_p = (z_k - z_a) + \frac{p_k - p_a}{\gamma} + \frac{u_k^2 - u_a^2}{2g}$$

Όσον αφορά τώρα την ισχύ των δυναμικών αντλιών διακρίνονται τρία βασικά είδη ισχύος:

- **Αξονική ισχύς, P_s** , είναι η ισχύς που μεταβιβάζεται στον άξονα της αντλίας από τον κινητήρα. Αν γνωρίζουμε την ισχύ P_k τότε μπορούμε να καθορίσουμε και τον βαθμό απόδοσης, η_k , του κινητήρα ως εξής :

$$\eta_k = \frac{P_s}{P_k}$$

- **Υδραυλική ισχύς, P_w** , είναι η ισχύς που μεταβιβάζεται στο διακινούμενο υγρό από την αντλία και δίνεται από την σχέση :

$$P_w = \gamma \dot{V} h_p$$

- **Εσωτερική ισχύς, P_e** , είναι η συνολική ισχύς που μεταβιβάζεται από την πτερωτή της αντλίας στο διερχόμενο από αυτήν υγρό και δίνεται από την σχέση:

$$P_e = \gamma \dot{V} h_e + P_f$$

- **Βαθμός απόδοσης, η_p** , ορίζεται ως :

$$\eta_p = \frac{P_w}{P_e}$$

- **Υδραυλικός βαθμός απόδοσης, η_h** , ορίζεται ως :

$$\eta_h = \frac{h_p}{h_e}$$

- **Αριθμός των στροφών N** εξαρτάται από το είδος και τον τρόπο σύνδεσης της κινητήριας μηχανής με τον άξονα της αντλίας

2.6.3.1.2 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Δυναμικών αντλιών

Ο καθορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών των αντλιών γίνεται πειραματικά και τα σχετικά αποτελέσματα δίνονται συνήθως σε μορφή διαγραμμάτων. Τα διαγράμματα αυτά χαράσσονται σχεδόν πάντοτε για σταθερό αριθμό στροφών, N , του άξονα της αντλίας. Η βασική ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η πραγματική παροχή V , η τιμή της οποίας μεταβάλλεται με τη ρύθμιση του ανοίγματος της βαλβίδας εκροής του υγρού από την αντλία. Ως εξαρτημένες μεταβλητές λαμβάνονται το ολικό μανομετρικό ύψος, h_p , η αξονική ισχύς, P_s , και ο ολικός βαθμός απόδοσης, η_p , της αντλίας. Με τον τρόπο αυτό καθορίζονται τρεις πειραματικές καμπύλες: η καμπύλη ύψους-παροχής [$h_p = f(V)$], η καμπύλη ισχύος-παροχής [$P_s = f(V)$] και η καμπύλη βαθμού απόδοσης-παροχής [$\eta_p = f(V)$]. Οι καμπύλες αυτές ονομάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες της αντλίας.

Οι κατασκευαστές των αντλιών παρέχουν τυπικά διαγράμματα τέτοιου είδους με δεδομένους κινητήρες, που διευκολύνουν την επιλογή της κατάλληλης αντλίας κατά το σχεδιασμό της μονάδας αφαλάτωσης. Εκεί επιδιώκεται η επιλεγόμενη αντλία να διαθέτει το επιθυμητό εύρος ογκομετρικής παροχής – ύψους που απαιτείται για την αφαλάτωση κοντά στο σημείο που έχει την υψηλότερη συνολική απόδοση.

2.6.3.1.3 Φυγόκεντρες Αντλίες

Από τα τέσσερα είδη δυναμικών αντλιών, οι φυγόκεντρες αντλίες (ή και φυγοκεντρικές όπως επίσης αποκαλούνται) αποτελούν στην πράξη το συνηθέστερο τύπο αντλητικού μηχανήματος. Στις φυγόκεντρες αντλίες, το σχήμα των πτερυγίων και η διάταξή τους είναι τέτοια ώστε το υγρό που εισέρχεται στο κέλυφος αξονικώς, να κινείται και εξέρχεται κάθετα προς τον άξονα της αντλίας, δηλαδή ακτινικώς. Για το λόγο αυτό, οι φυγόκεντρες αντλίες αναφέρονται συχνά και ως αντλίες ακτινικής ροής. Η αύξηση της πίεσης του υγρού οφείλεται στη δράση της αναπτυσσόμενης φυγόκεντρης δύναμης.

Στις μονάδες αφαλάτωσης είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη η εγκατάσταση φυγοκεντρικών αντλιών σε σειρά με δεδομένο ότι απαιτείται μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ αναρρόφησης και κατάθλιψης.

Στις μονάδες αφαλάτωσης κατά κανόνα υπάρχει μία φυγοκεντρική αντλία τροφοδοσίας, που παρέχει την απαιτούμενη πίεση, ώστε το τροφοδοτούμενο ακατέργαστο νερό συμπεριλαμβανομένων των απωλειών πίεσης σε συστήματα φιλτραρίσματος της προκατεργασίας (αμμόφιλτρα, φίλτρα φύσιγγας κλπ) να έχει τουλάχιστον πίεση εισόδου 1 – 2 bar στην αναρρόφηση της αντλίας υψηλής πίεσης που μπορεί να είναι φυγόκεντρη ή θετικής εκτόπισης.

Για την εξασφάλιση της υψηλής πίεσης που απαιτείται στην είσοδο των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται πολυβάθμιες φυγόκεντρες αντλίες. Είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιηθούν έως και 3 πολυβάθμιες αντλίες εν σειρά σε αφαλατώσεις θαλασσινού νερού. Σημειώνεται ότι σε αυτή τη σύνδεση η χοάνη κατάθλιψης της μιας συνδέεται με το στόμιο εισόδου της άλλης. Επίσης, η ολική παροχή είναι ίση με την παροχή κάθε αντλίας, ενώ τα μανομετρικά τους ύψη αθροίζονται.

Εξίσου συνηθισμένη είναι και η παράλληλη σύνδεση δύο αντλιών (πολλές φορές η μία λειτουργεί ως εφεδρική). Σε αυτή τη σύνδεση οι παροχές αθροίζονται (αντίθετα το μανομετρικό ύψος του συστήματος των αντλιών είναι ίσο με το μανομετρικό ύψος κάθε αντλίας). Στις παράλληλες συνδέσεις τα στόμια εξόδου των αντλιών συνδέονται στην ίδια σωλήνωση κατάθλιψης ενώ τοποθετείται βαλβίδα αντεπιστροφής στην έξοδο κάθε αντλίας για να αποφεύγεται η αντίστροφη ροή του υγρού μέσω της αντλίας που διακόπτει τη λειτουργία της. Στις μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού που εξετάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν υποβρύχιες πολυβάθμιες φυγόκεντρες αντλίες (άντληση θαλασσινού νερού), παρεμφερής τύπος σε χιτώνιο ως βοηθητική αντλία για τον εναλλάκτη πίεσης, πολυβάθμιες κάθετες φυγόκεντρες αντλίες για χρήσεις όπως η διενέργεια ξεπλυμάτων και χημικού καθαρισμού καθώς και για την προώθηση του πόσιμου νερού στις τελικές δεξαμενές.

2.6.3.1 Περιτροφικές αντλίες θετικής εκτόπισης

Στις αντλίες θετικής εκτόπισης, το αντλητικό στοιχείο της αντλίας παραλαμβάνει μια ποσότητα υγρού η οποία παγιδεύεται εντός θαλάμου και τη μετατοπίζει στο χώρο,

αυξάνοντας τη στατική πίεση του υγρού και χωρίς να μεταβάλλει την κινητική του ενέργεια. Η παροχή των αντλιών αυτών είναι ανεξάρτητη από την υδραυλική αντίσταση των αγωγών μεταφοράς του υγρού. Οι αντλίες θετικής εκτόπισης είναι κατάλληλες για ανάπτυξη υψηλής πίεσης και μικρής παροχής. Το βασικό τους πλεονέκτημα, εκτός από την ανάπτυξη υψηλής πίεσης είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη διακίνηση υγρών με μεγάλο ιξώδες.

Στις περιστροφικές αντλίες, ο θάλαμος στον οποίο εγκλωβίζεται η ποσότητα του υγρού δεν είναι σταθερός, αλλά κινείται από την είσοδο προς την έξοδο και πάλι πίσω στην είσοδο της αντλίας. Οι αντλίες αυτές έχουν ένα ή περισσότερα κινούμενα στοιχεία τα οποία περιστρέφονται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα μέσα στο κέλυφος της αντλίας, οπότε η παρεχόμενη ροή είναι συνεχής. Οι περιστροφικές αντλίες κατατάσσονται στις αντλίες θετικής εκτόπισης, γιατί η πίεση κατάθλιψης δημιουργείται με ώθηση του υγρού και όχι με μεταβολή της κινητικής του ενέργειας (όπως συμβαίνει στις δυναμικές αντλίες).

2.6.4 Ηλεκτροκινητήρες Αντλιών

Ο ηλεκτροκινητήρας θα μπορούσε να οριστεί ως μια ηλεκτρομηχανική διάταξη μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική με την μορφή περιστροφικής κίνησης. Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, βασίζεται στην δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου στο στάτη (δηλαδή, το ακίνητο μέρος της ηλεκτρικής μηχανής), μέσω του οποίου εξαναγκάζεται σε περιστροφή ο δρομέας, που αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα.

Η ταξινόμηση των ηλεκτροκινητήρων προέκυψε όταν η Ευρωπαϊκή Ένωση σε συνεργασία με την CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) έθεσε νέες προδιαγραφές για την αύξηση της απόδοσης των συστημάτων κίνησης. Στόχος ήταν η ελάττωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, η μείωση των λειτουργικών εξόδων των ευρωπαϊκών επιχειρήσεων και η μείωση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα.

Η CEMEP όρισε κλάση απόδοσης για διπολικούς και τετραπολικούς, τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες με κλωβό, με ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας 400 V, 50 Hz, κύκλου λειτουργίας S1 και με ισχύ από 1,1 έως 90 kW. Η απόδοση χωρίστηκε σε τρεις κλάσεις*:

- I. "Eff1" Κινητήρες Υψηλής Απόδοσης (High-efficiency motors)
- II. "Eff2" Κινητήρες Βελτιωμένης Απόδοσης (Improved-efficiency motors)
- III. "Eff3" Κινητήρες Κανονικής Απόδοσης (Standard motors)

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση τετραπολικών κινητήρων βάση της αποδοτικότητας τους ανάλογα της ισχύος τους

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

Ισχύ Κινητήρα σε kW	Αποδοτικότητα%		
	EFF1 ίση ή μεγαλύτερη	EFF2 ίση ή μεγαλύτερη	EFF3 μικρότερη
1.1	83.8		76.2
1.5	85.0		78.5
2.2	86.4		81.0
3	87.4		82.6
4	88.3		84.2
5.5	89.2		85.7
7.5	90.1		87.0
11	91.0		88.4
15	91.8		89.4
18.5	92.2		90.0
22	92.6		90.5
30	93.2		91.4
37	93.6		92.0
45	93.9		92.5
55	94.2		93.0
75	94.7		93.6
90	95.0		93.9

Η θεωρία των ηλεκτρικών μηχανών αποδεικνύει ότι οι στροφές ενός ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα, μεταβάλλονται ανάλογα με την συχνότητα της τάσης με την οποία τροφοδοτείται η μηχανή. Πάνω σε αυτό το χαρακτηριστικό στηρίζεται η αρχή λειτουργίας των διατάξεων ρύθμισης στροφών (variable speed drive / variable frequency drives ή εμπορικά επωνομαζόμενα frequency inverters) που χρησιμοποιούνται σήμερα στις εφαρμογές όπου απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας των ασύγχρονων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Πρακτικά με τη χρήση των ρυθμιστών στροφών επιτυγχάνεται ακρίβεια στην ταχύτητα του κινητήρα με αποτέλεσμα να είναι εύκολο να προσαρμοστεί στις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας, επιτρέπει δηλαδή την ταχύτητα να μεταβάλλεται σύμφωνα με το αντίστοιχο φορτίο και έτσι μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση.

2.6.5 Συστήματα Ανάκτησης Ενέργειας

Το αλμόλοιπο, καθώς εξέρχεται από το στοιχείο της μεμβράνης, έχει πολύ υψηλή πίεση (έως 96% της πίεσης του ρεύματος εισόδου), ενώ το παραγόμενο νερό έχει χαμηλή έως αμελητέα πίεση. Επομένως ειδικά για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού ήταν λογικό να γίνουν προσπάθειες με σκοπό να ανακτηθεί ένα σημαντικό ποσό ενέργειας από το απορριπτόμενο αλμόλοιπο.

Στην αφαλάτωση υφάλμυρου νερού είναι συνηθισμένο να μην υπάρχει κανένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας επειδή το ενεργειακό κόστος είναι σχετικά χαμηλό ενώ και η παροχή του αλμόλοιπου είναι συνήθως χαμηλότερη από το 30% της παροχής τροφοδοσίας.

Σε αυτό το πλαίσιο έχουν δημιουργηθεί και χρησιμοποιηθεί διάφορες διατάξεις ανάκτησης ενέργειας με κυριότερες τις παρακάτω :

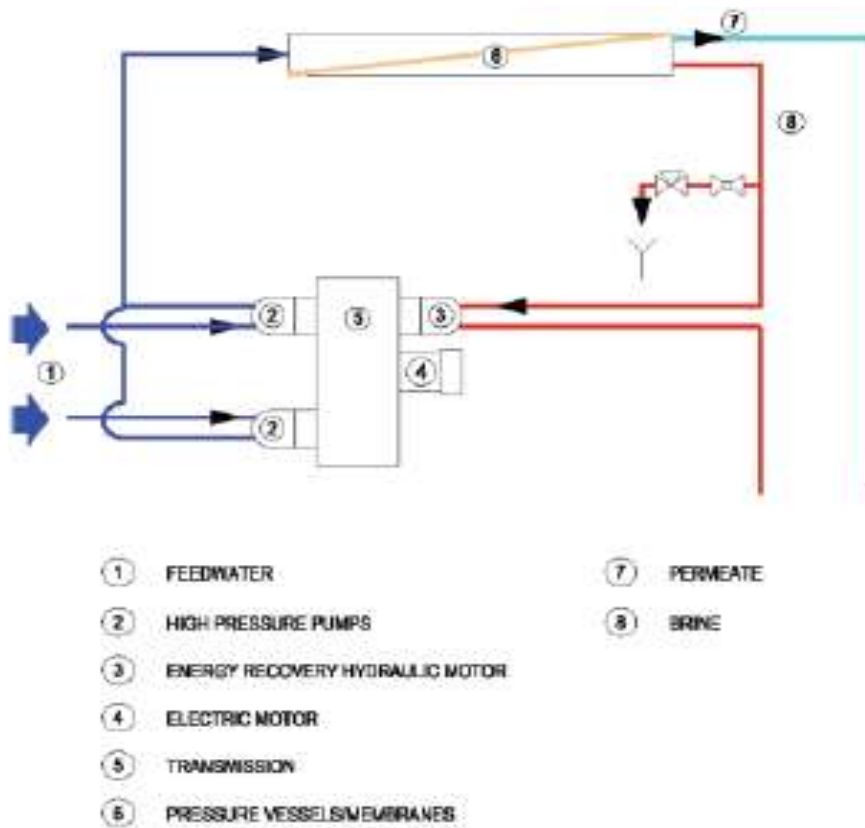
- I. Αντίστροφη Υδραυλική Αντλία (reverse running pump)
- II. Υδροστρόβιλος Πέλτον (Pelton Wheel)
- III. Hydraulic Turbo Charger
- IV. Εναλλάκτης Πίεσης (Pressure Exchanger)
- V. Εναλλάκτης Έργου (Work Exchanger)

Βάση των παραπάνω έχουν οριστεί εμπορικά γενιές αφαλάτωσης, όπου η 1η γενιά δεν συμπεριλαμβάνει καμία διάταξη ανάκτησης ενέργειας και είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα, η 2η γενιά περιλαμβάνει διατάξεις ανάκτησης ενέργειας μέτριας απόδοσης όπως ο υδροστρόβιλος Pelton, ο Hydraulic Turbo Charger, ο υδροστρόβιλος Francis και τέλος η 3η γενιά περιλαμβάνει νεότερες διατάξεις με πολύ υψηλή απόδοση όπως ο εναλλάκτης πίεσης ή ο εναλλάκτης έργου (Work Exchanger) που είναι όμως λιγότερο διαδεδομένος.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η εγκατάσταση αυτόνομης μονάδας αφαλάτωσης μικρής παραγωγικότητας για την ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix. Σε τέτοιες μονάδες μικρής παραγωγικότητας, η πλέον συμφέρουσα διάταξη ανάκτησης ενέργειας από τον αλμόλοιπο είναι ο εναλλάκτης πίεσης.

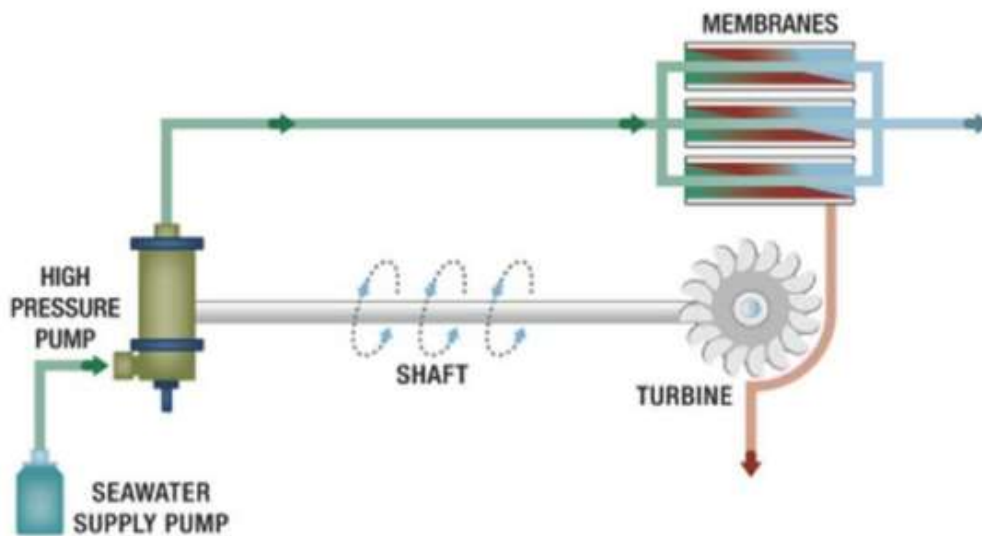
Οι εικόνες 2.7, 2.8, 2.9 και 2.10 απεικονίζουν διαγράμματα ροής των διατάξεων της αντίστροφης υδραυλικής αντλίας, του υδροστροβίλου Pelton και του Hydraulic Turbo Charger αντίστοιχα.

Στην επόμενη παράγραφο θα αναλυθεί η αρχή λειτουργίας του εναλλάκτη πίεσης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και στην εγκατάσταση που περιγράφεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.



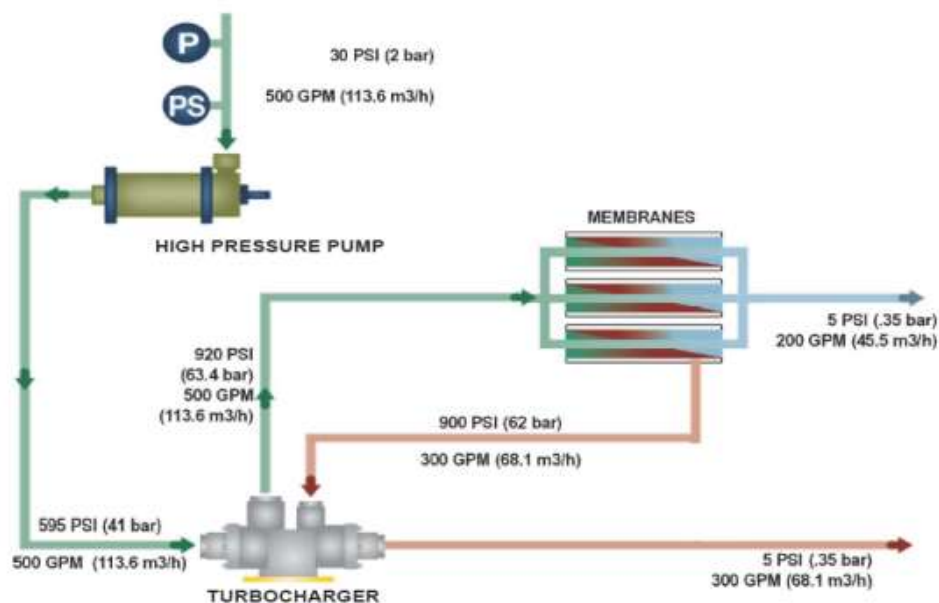
Εικόνα 2-7 Διάγραμμα Ροής διάταξης ανάκτησης ενέργειας τύπου Αντίστροφης Υδραυλικής Αντλίας.

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011



Εικόνα 2-8 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας τύπου Pelton Wheel

Πηγή : Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices, Mageed Jean Guirguis,2011

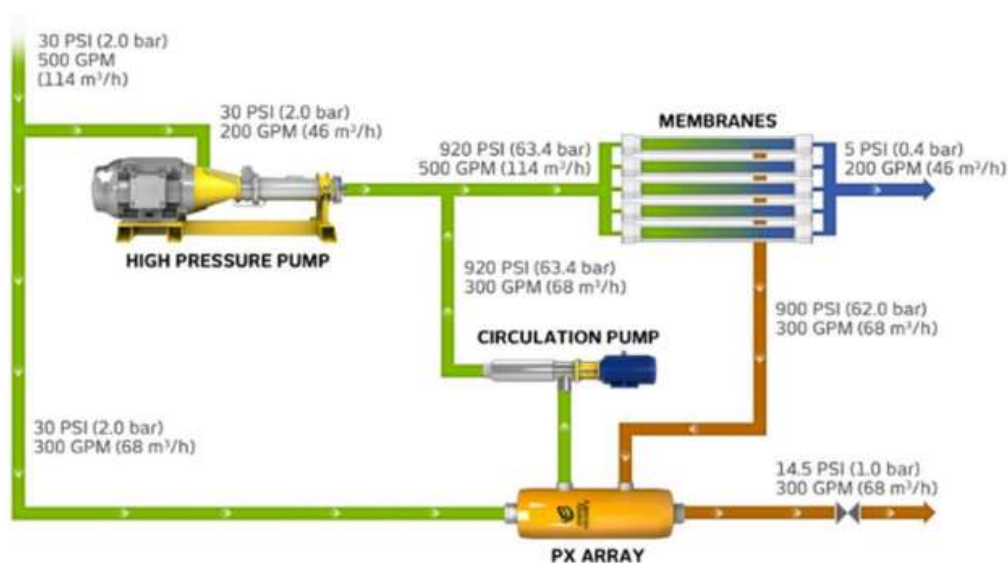


Εικόνα 2-9 Διάταξη ανάκτησης ενέργειας τύπου Hydraulic Turbo Booster

Πηγή : Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices, Mageed Jean Guirguis,2011

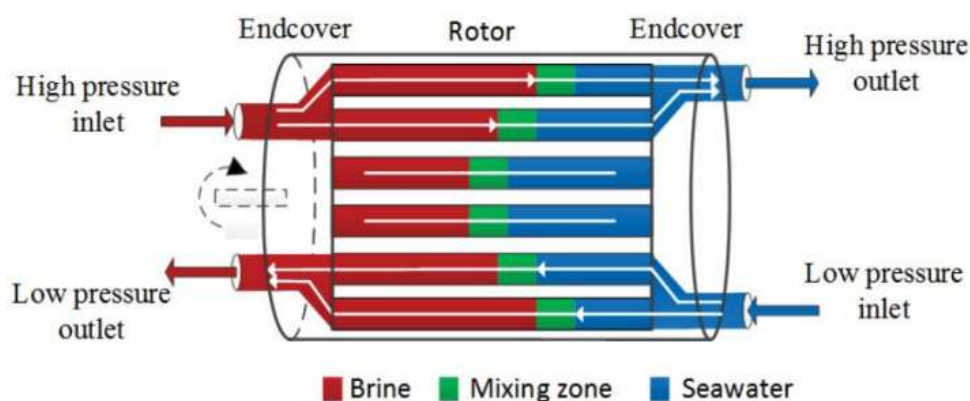
2.6.5.1. Εναλλάκτης Πίεσης (Pressure Exchanger)

Ο εναλλάκτης πίεσης χρησιμοποιεί την αρχή των αντλιών θετικής εκτόπισης επιτρέποντας στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό προς αφαλάτωση να λάβει απευθείας την κινητική ενέργεια από το απορριπτόμενο αλμόλιπο υψηλής πίεσης. Με τον εναλλάκτη πίεσης είναι δυνατή 95 έως 98% ανάκτηση της πίεσης του αλμόλιπου και αυτό συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 30-40% [Geisler, 1999]. Κατατάσσεται όπως και ο εναλλάκτης έργου στις διατάξεις ανάκτησης ενέργειας πρώτης κλάσης (Class I Energy Recovery Device), [MacHarg, 2001].



Εικόνα 2-10 P&ID Reversis Osmosis plant with Pressure Exchanger

Πηγή : Trends & Developments in Advanced Energy Recovery Technologies for Desalination, ROC, May 2013



Εικόνα 2-11 Απλοποιημένη διάταξη τύπου Εναλλάκτη Πίεσης

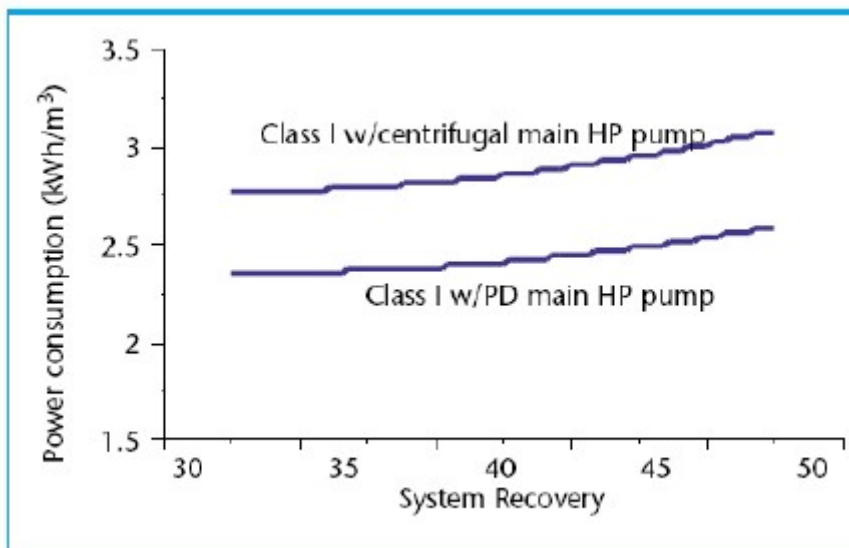
Πηγή : The research and application progress of the isobaric ERD technique for

SWRO desalination plant, Kaier Lianga, Qingfen Maa, Hui Luc, Haixuan Fanga, Peng Yanga , Junqing Fana, October 2020

Ο εναλλάκτης πίεσης, περιλαμβάνει κυλινδρικό περιστροφέα με αυλούς (ducts), τοποθετημένο σε κυλινδρικό περίβλημα ανάμεσα σε δύο καπάκια, που έχει συνδέσεις για χαμηλή και υψηλή πίεση. Η πλευρά χαμηλής πίεσης του περιστροφέα γεμίζει με θαλασσινό νερό και η πλευρά υψηλής πίεσης εκτονώνει θαλασσινό νερό. Ανάμεσα στο θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης, το θαλασσινό νερό εισόδου χαμηλής πίεσης, τον αλμόλοιπο χαμηλής πίεσης, τον αλμόλοιπο υψηλής πίεσης, το αφαλατωμένο νερό και του περιστροφέα υπάρχει μία περιοχή στεγάνωσης (sealing area) που απομονώνει και διαχωρίζει τον περιστροφέα σε χαμηλής και υψηλής πίεσης. Με την περιστροφή οι αυλοί του περιστροφέα εκτίθενται πρώτα στο χαμηλής πίεσης νερό τροφοδοσίας (θαλασσινό), που γεμίζει τις οπές και εκτοπίζει το αλμόλοιπο. Με την κίνηση του περιστροφέα μετά την περιοχή στεγάνωσης, εκτίθεται στο αλμόλοιπο υψηλής πίεσης, που γεμίζει τις οπές και εκτοπίζει το εισερχόμενο νερό (θαλασσινό) σε υψηλή πίεση [Stover, 2004].

Η πίεση που αποκτά το ρεύμα τροφοδοσίας των μεμβρανών (θαλασσινό νερό), είναι μικρότερο της απαιτούμενης πίεσης στην είσοδο των μεμβρανών, λόγω απωλειών στις μεμβράνες (πτώση πίεσης), στον εναλλάκτη πίεσης και στο υδραυλικό δίκτυο. Οπότε απαιτείται μία μικρή αντλία ενίσχυσης (booster pump) χαμηλού συνολικού μανομετρικού ύψους για παροχή περίπου ίση με του αλμόλοιπου.

Η εξοικονόμηση ενέργειας προκύπτει με τη μείωση της απαιτούμενης παροχής της αντλίας υψηλής πίεσης. Για αυτό το λόγο οι διατάξεις ενέργειας πρώτης κλάσης παρέχουν εξαιρετικά αποτελέσματα όταν συνδυάζονται με αντλίες θετικής εκτόπισης που επιτυγχάνουν υψηλού βαθμού υδραυλική απόδοση ακόμα και σε πολύ μικρές παροχές, πρακτικά ανεξάρτητα του συνολικού μανομετρικού ύψους που απαιτείται για τις εφαρμογές αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Στο παρακάτω σχήμα 2.7 φαίνεται η ενεργειακή κατανάλωση ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου νερού σε σχέση με το ποσοστό ανάκτησης.



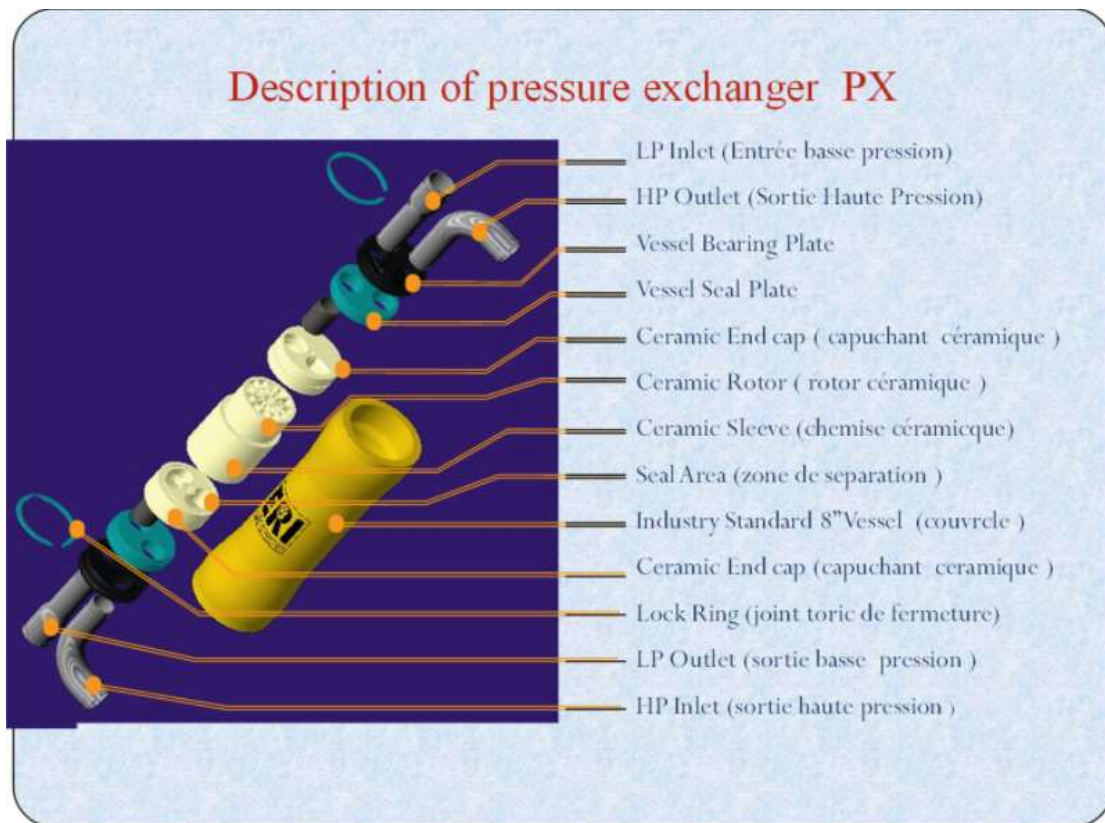
Σχήμα 2-7 Συγκριτικό διάγραμμα ανηγμένης ενεργειακής κατανάλωσης παραγόμενου νερού συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού σε σχέση με το ποσοστό ανάκτησης του.

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

Λόγω της υψηλής του απόδοσης, αξιοπιστίας καθώς και της δυνατότητας να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος δυναμικότητας μονάδος αφαλάτωσης (από μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού 40 m³/ημέρα έως εργοστάσια αφαλάτωσης δυναμικότητας εκατοντάδων χιλιάδων κυβικών νερού) έχει εξελιχθεί στην κυρίαρχη τεχνολογία με κύριο αντίπαλο τις διατάξεις τύπου Turbocharger, για τα μεγαλύτερης δυναμικότητας συστήματα. Ένα από τα μεγαλύτερα εργοστάσια αφαλάτωσης στον κόσμο, στο Ashkelon του Ισραήλ δυναμικότητας 330.000 m³/ημέρα χρησιμοποιεί τους εναλλάκτες πίεσης, για την ανάκτηση ενέργειας.

Όπως φαίνεται από την εικόνα 2.12 ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν τα υλικά κατασκευής του εναλλάκτη πίεσης καθώς η επιλογή τους έπαιξε ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία και την εδραίωση του ως σύστημα ανάκτησης ενέργειας. Συγκεκριμένα, το περίβλημα είναι από σύνθετο υλικό, πολυεστέρα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού με αντοχή σε πίεση λειτουργίας έως 82 bar.

Ο κυλινδρικός περιστροφέας είναι από κεραμικό υλικό (κορούνδιο) πολύ υψηλής σκληρότητας (της τάξης των 9 Mohs) ώστε πρακτικά να θεωρείται ότι δεν υπόκειται σε φθορά για τουλάχιστον 2 χρόνια λειτουργίας. Αντίστοιχα και τα λίγα μεταλλικά τμήματα που έρχονται σε επαφή με το θαλασσινό νερό είναι κατασκευασμένα από υλικά εξαιρετικά υψηλής αντοχής στη διάβρωση όπως οι ανοξείδωτοι χάλυβες τύπου super duplex, κράματα όπως το AL-6XN (superaustenitic stainless steel) ή νικελίου-χρωμίου- μολυβδενίου (C-276 hastelloy) ή τιτάνιο.



Εικόνα 2-12 Pressure Exchanger – Exploded view

Πηγή : Optimization of Energy Cost Seawater Desalinization by Reverse Osmosis: Case of Bousmail Station in Algeria, Souad Bouzid-LaghaEmail,Yacine Matrouh, August 2018

2.7 Υδραυλικά κυκλώματα – Όργανα μέτρησης

2.7.1 Σωληνώσεις – Εξαρτήματα Σύνδεσης

Σε μία μονάδα αφαλάτωσης, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για θαλασσινό νερό τροφοδοσίας, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις σωληνώσεις που θα χρησιμοποιηθούν, μιας και πρόκειται για ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον.

Συνεπώς επιλέγονται σωληνώσεις που είναι ανθεκτικές στην διάβρωση και το δίκτυο χωρίζεται σε χαμηλής και υψηλής πίεσης.

Το δίκτυο χαμηλής πίεσης κατασκευάζεται συνήθως από πλαστικές σωλήνες με βασικό τους υλικό το μη χλωριωμένο πολυβινυλοχλωρίδιο (u-PVC), με ονομαστική πίεση λειτουργίας τα 16 bar (PN16).

Το δίκτυο υψηλής πίεσης κατασκευάζεται από ανοξείδωτους χάλυβες υψηλής αντοχής στην διάβρωση του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού, όπως ο duplex (UNS S31803 ή 1.4462 κατά EN/DIN), ο super duplex, ο AISI 904 L και περιορισμένα ο AISI 316/316L. Επίσης μπορεί να είναι κατασκευασμένο από κοινό χάλυβα με εσωτερική επένδυση από ένα μη μεταλλικό υλικό ή κάποιο άλλο μέταλλο το οποίο είναι

ανθεκτικό στη διάβρωση. Γενικά οι μεταλλικοί αγωγοί έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τους μη μεταλλικούς ενώ το κόστος αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της αντίστασης στη διάβρωση.

Ο τρόπος σύνδεσης γενικότερα δύο αγωγών εξαρτάται από το ίδιο το υλικό κατασκευής των σωλήνων και από την διάμετρό τους. Οι πλαστικές σωλήνες u-PVC συνδέονται μεταξύ τους με μούφες ή φλάντζες χρησιμοποιώντας μια ειδική κόλλα. Η σύνδεση χαλυβδοσωλήνων μπορεί να γίνει με βιδωτά εξαρτήματα, με φλάντζες ή ταχυσυνδέσμους καθώς και με συγκόλληση. Τα βιδωτά εξαρτήματα χρησιμοποιούνται συνήθως για συνδέσεις σωλήνων μικρής διαμέτρου (μέχρι 2 - 3 ίν) και αυτό, γιατί η διάνοιξη σπειρώματος και ο χειρισμός σωλήνων μεγάλης διαμέτρου είναι γενικά πολύ δύσκολος.

Οι φλάντζες χρησιμοποιούνται συνήθως για συνδέσεις σωλήνων διαμέτρου μεγαλύτερης των 2 – 3 in. Οι φλάντζες είναι χαλύβδινοι δίσκοι ή δακτύλιοι οι οποίοι φέρουν, περιφερειακά, οπές από τις οποίες διέρχονται οι κοχλίες σύσφιξης. Οι ίδιες οι φλάντζες προσαρμόζονται στα άκρα των συνδεόμενων σωλήνων με κοχλίωση ή συγκόλληση.

Ο συνηθέστερος τρόπος σύνδεσης μεταλλικών σωλήνων είναι οι λεγόμενοι ταχυσύνδεσμοι, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές αφαλάτωσης με πιέσεις μικρότερες των 82bar. Ο λόγος που προτιμώνται αυτού του είδους οι συνδέσεις είναι επειδή είναι πολύ εύκολη η σύνδεσή τους και κοστίζουν λιγότερο.

Η συγκόλληση χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύνδεση χαλυβδοσωλήνων που μεταφέρουν ρευστά υπό υψηλή πίεση. Οι συνδέσεις του τύπου αυτού είναι στεγανές και πολύ ισχυρές, χωρίς να εξασθενούν τα πάχη των συνδεόμενων σωλήνων, γεγονός που επιτρέπει τη χρησιμοποίηση ελαφρότερων σωλήνων για μια δεδομένη πίεση. Οι συγκολλήσεις και κυρίως οι αυτογενείς σε αδρανή ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις μονάδες αφαλάτωσης ενώ η εξασφάλιση της άριστης εφαρμογής τους είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Σε όλα τα δίκτυα, είτε υψηλής είτε χαμηλής πίεσης, χρησιμοποιούνται βαλβίδες. Με τον όρο βαλβίδα νοείται κάθε εξάρτημα που έχει ως σκοπό την ρύθμιση της ροής σε μια σωλήνωση. Ανάλογα με την λειτουργία τους οι βαλβίδες χωρίζονται σε : διακοπής, ρύθμισης, αντεπιστροφής. Στις μονάδες αφαλάτωσης χρησιμοποιούνται είτε σφαιρικές βάνες ή πεταλούδας, είτε βάνες διαφράγματος και βάνες αντεπιστροφής με κλαπέ ή ανυψώμενο δίσκο.

2.7.2. Όργανα Μέτρησης

Σε μια μονάδα αφαλάτωσης, είναι πάρα πολύ σημαντικό να εγκαθίστανται όλα τα απαραίτητα όργανα ελέγχου αφενός για την επιτήρηση της μονάδας καθώς και για να επιτηρούνται οι διαδικασίες προκατεργασίας και μετεπεξεργασίας του παραγόμενου νερού. Επιγραμματικά σε μια μονάδα τοποθετούνται τα παρακάτω όργανα :

1. Μηχανικά ανοξείδωτα μανόμετρα

2. Μανόμετρα 0-10 atm από ανοξείδωτο χάλυβα 316 L
3. Ψηφιακοί μετρητές pH
4. Ψηφιακός μετρητής REDOX
5. Ψηφιακό όργανο μέτρησης θερμοκρασίας θαλασσινού νερού
6. Ψηφιακοί μετρητές αγωγιμότητας
7. Ψηφιακοί μετρητές παροχής
8. Πρεσοστάτες χαμηλής και υψηλής πίεσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Βασικοί παράμετροι σχεδιασμού μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση

3.1 Ποιότητας ακατέργαστου Νερού (Νερό τροφοδοσίας της μονάδας)

Το νερό που πρόκειται να επεξεργαστεί σε μια μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να προέρχεται είτε από τη θάλασσα είτε να είναι υφάλμυρο. Η “ποιότητα” που θα έχει το νερό τροφοδοσίας της μονάδας πρόκειται να παίξει σημαντικό ρόλο τόσο στον σχεδιασμό της όσο και στην ίδια την λειτουργία και αποτελεσματικότητά της.

Κατά συνέπεια πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον προσδιορισμό των ανεπιθύμητων στοιχείων που αυτό περιέχει, έτσι ώστε να γίνει η βέλτιστη σχεδίαση της μονάδας αφαλάτωσης.

Το νερό τροφοδοσίας περιέχει διάφορες ουσίες που είτε είναι διαλυμένες σε αυτό είτε πρόκειται για αιωρούμενα σωματίδια, οι οποίες προέρχονται από τα πετρώματα του εδάφους, τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς και την ατμόσφαιρα.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού που παίζουν σημασία για την διεργασία της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση είναι :

- Φυσικά χαρακτηριστικά
 - I. Θερμοκρασία
 - II. Αγωγιμότητα
 - III. Ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSS)
 - IV. Θολότητα
- Χημικά χαρακτηριστικά
 - I. pH
 - II. Αλατότητα
 - III. Ολικά διαλυμένα στερεά (T.D.S.)
 - IV. Σκληρότητα
 - V. Ιόντα (πχ Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , κλπ)
 - VI. Πρωτεΐνες, οργανικές ενώσεις, αέρια
- Βιολογικά χαρακτηριστικά
 - I. Μικροοργανισμοί (βακτήρια, ιοί, μύκητες κλπ)

Παρακάτω δίνονται οι ορισμοί από συγκεκριμένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, για να είναι πιο ξεκάθαρη η έννοια τους στην συνέχεια.

Αγωγιμότητα ενός διαλύματος είναι η μαθηματική έκφραση της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων, το σθένος τους, την κινητικότητά τους, τη συγκέντρωσή τους, τη θερμοκρασία και το ιξώδες του διαλύματος, καθώς και το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού, με την οποία γίνεται η μέτρηση. Σε ένα υδατικό διάλυμα, η αγωγιμότητα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων στο υγρό. Όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση των αλάτων τόσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα.

Ως **θολότητα** ορίζεται η αντίσταση του νερού στην διέλευση του φωτός και οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη αργίλου σε αιώρηση και άλλων λεπτόκοκκων και κολλοειδών υλών, μετριέται σε μονάδες θολότητας (NTU) (Nephelometric Turbidity Unit) ή σε mg/l (ppm) διοξειδίου του πυριτίου (SiO₂). Η θολότητα χρησιμοποιείται ως ένδειξη της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων του νερού. Παρόλο που η θολότητα είναι μία καλή παράμετρος για το συνολικό περιεχόμενο σε σωματίδια του νερού, δεν αποτελεί επαρκής παράμετρος για να χαρακτηρίσει π.χ το δυναμικό του θαλασσινού νερού για έμφραξη από σωματίδια ή άλλο τύπο

Αλατότητα είναι η συνολική ποσότητα των στερεών ουσιών σε γραμμάρια που περιέχονται σε 1 κιλό θαλασσινό νερό. Η αλατότητα των θαλασσών κυμαίνεται μεταξύ 32 – 37,5% με χαμηλές τιμές στους πόλους της γης και πολύ υψηλές στις τροπικές ζώνες.

Τα **ολικά διαλυμένα στερεά** (Total Dissolved Solids ή T.D.S) εκφράζει τη συνολική συγκέντρωση των διαλυμένων στο νερό αλάτων, χωρίς να περιλαμβάνονται τα αιωρούμενα ιζήματα, τα κολλοειδή και τα διαλυμένα αέρια.

Η **σκληρότητα** των νερών προέρχεται από την παρουσία δισθενών μεταλλικών κατιόντων, εκ των οποίων τα πιο συνηθισμένα είναι το Ca²⁺ και το Mg²⁺. Η σκληρότητα εκφράζεται σε Γαλλικούς βαθμούς (ένας βαθμός αντιστοιχεί σε 1mg CaCO₃ ανά 100 ml νερού) ή σε Γερμανικούς βαθμούς (ένας βαθμός αντιστοιχεί σε 1mg CaO ανά 100 ml νερού).

Από τα ιόντα που υπάρχουν στο νερό είναι πολύ σημαντικά τα ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου, λόγω της δημιουργίας επικαθίσεων στα μεταλλικά και λοιπά εξαρτήματα και λόγω αύξησης της σκληρότητας του νερού. Σημαντικά είναι και τα ιόντα σιδήρου, χαλκού ή αργιλίου διότι προκαλούν τη διάβρωση των μεταλλικών τμημάτων και συμμετέχουν στο σχηματισμό αποθέσεων στις μεμβράνες. Τα διαλυμένα στο νερό θρεπτικά άλατα παίζουν καθοριστικό ρόλο στη βιολογική παραγωγικότητα. Το άζωτο και ο φωσφόρος θεωρούνται οι πλέον σημαντικοί παράγοντες για την ανάπτυξη των οργανισμών.

Οι διάφοροι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στα νερά ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις, δημιουργούν προβλήματα κυρίως στις μεμβράνες, ενώ ενδέχεται να αποικίσουν και άλλα μέρη του συστήματος αφαλάτωσης, δημιουργώντας ανεπιθύμητες επικαθίσεις.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κατηγοριοποίηση των φυσικών νερών σύμφωνα με την τάση τους να προκαλούν έμφραξη στις μεμβράνες, από άλατα.

3.1.1 Υφάλμυρο Νερό

Η σύσταση του υφάλμυρου νερού καλύπτει ένα ευρύτατο φάσμα περιεκτικότητας σε άλατα και συνεπώς μια πολύ λεπτομερής ανάλυσή του είναι ένα πολύ βασικό προαπαιτούμενο για τον καλό σχεδιασμό και λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης.

Η σύσταση του υφάλμυρου νερού είναι ανάλογη του υδροφόρου από όπου προέρχεται. Επίσης εάν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πολύ μεγάλος, ή αν ο ρυθμός άντλησης του νερού είναι ίσος με τον ρυθμό εναπόθεσής του, τότε η σύσταση του νερού τροφοδοσίας θα παραμένει σχεδόν σταθερή. Σε περιπτώσεις που ο υδροφόρος βρίσκεται κοντά στη θάλασσα υπάρχει η πιθανότητα διείσδυσης θαλασσινού νερού και σημαντικής αύξησης της αλατότητας, φαινόμενο συνηθισμένο στην Ελλάδα, ειδικά σε νησιωτικές περιοχές. Ενδεικτικά παρατίθεται ο πίνακας 3.2 από το εγχειρίδιο της Dupont για νερό διαφορετικής προέλευσης και γεωγραφικής περιοχής.

Πίνακας 3-2 Παραδείγματα σύστασης υφάλμυρου νερού (Dupont)

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

Parameter	Unit	Well water ¹	Well water ²	Lake water ³	Surface water ⁴	Pretreated tertiary effluent ⁵
Calcium	mg/L	84	113	54	102	40 – 64
Magnesium	mg/L	6	2.7	23	11	—
Sodium	mg/L	36	23	87	20	150 – 200
Potassium	mg/L	3.3	2	6.6	4	—
Iron	mg/L	< 0.05	0.2	0.05	ND – 0.15	0.02 – 0.09
Manganese	mg/L	0.01	0.1	< 0.01	< 0.01	< 0.05
Barium	mg/L	0.07	0.1	0.09	—	0.01 – 0.1
Strontium	mg/L	0.7	1	1	—	0.2 – 1
Ammonium	mg/L	< 0.05	—	—	0.3	22 – 66
Aluminum	mg/L	0.02	—	0.02	ND – 0.15	0.03
Chloride	mg/L	45	52	67	33	150 – 500
Bicarbonate	mg/L	265	325	134	287	48.8 – 97.6
Sulfate	mg/L	24	8	201	56	120 – 160
Nitrate	mg/L	4.3	4	<1.0	15	40 – 60
Fluoride	mg/L	0.14	0.7	—	0.25	0.7 – 0.7
Phosphate	mg/L	< 0.05	0.6	0.01	1.2	6.1 – 12.2
Silica	mg/L	9	11	3.1	7 – 17	6 – 10
Hydrogen Sulfide	mg/L	—	1.5	—	—	ND
TDS	mg/L	478	377	573	400	500 – 1,300
TOC	mg/L	1.5	10	3.6	2.4	20 – 30 (COD)
Color	Pt	< 5	40	—	< 5	13 (Hazen)
Turbidity	NTU	—	—	—	2 – 130	0.4 – 1.7
pH	—	7.5	7.4	8.2	8	6.6 – 7.4
Conductivity	µS/cm	590	—	879	400 – 700	700 – 2,200
Temperature	°C	12	23 – 28	—	3 – 25	25 – 35

1. Well water: Germany
2. Well water: The Turplike Aquifer in Florida (design of the Boynton Beach, FL Membrane Softening Water Treatment, Proc. AWWA Annual Conference, Eng. And Op., 139 (1992))
3. Lake Mead, Nevada (2000)
4. River Oise, France
5. Tertiary effluent: industrial water in Jurong Island, Singapore (Water Reclamation - The Jurong Island Experience - SUT Seraya using Fouling Resistant RO Membrane to Reclaim Wastewater, IDA, Bahrain (2002))

3.1.2 Θαλασσινό νερό

Το θαλασσινό νερό περιέχει συνήθως όλα σχεδόν τα γνωστά στοιχεία υπό τη μορφή ιόντων. Η πλειοψηφία όμως των στοιχείων αυτών είναι σε τόσο μικρές ποσότητες και άρα μπορούν να αγνοηθούν. Μια πλήρης ανάλυση της σύστασης θαλασσινού νερού για το Αιγαίο πέλαγος δείχνει μια αυξημένη συγκέντρωση αλάτων εξαιτίας του ότι η Μεσόγειος είναι μια κλειστή θάλασσα και η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το καλοκαίρι ευνοεί την εξάτμιση. Στους πίνακες 3.3 και 3.4 φαίνονται, για διάφορες αλατότητες η ανόργανη σύνθεση του θαλασσινού νερού καθώς και η αλατότητα και η αγωγιμότητα διαφόρων θαλασσινών περιοχών.

Πίνακας 3-3 Ανόργανη σύνθεση θαλασσινού νερού για διάφορες αλατότητες

Water	K (ppm)	Na (ppm)	Mg (ppm)	Ca (ppm)	HCO₃ (ppm)
Standard seawater - 32,000 ppm	354	9,854	1,182	385	17,742
Standard seawater - 35,000 ppm	387	10,778	1,293	421	19,406
Standard seawater - 36,000 ppm	398	11,086	1,330	433	19,96
Standard seawater - 38,000 ppm	419	11,663	1,399	456	20,999
Standard seawater - 40,000 ppm	441	12,278	1,473	480	22,105
Standard seawater - 45,000 ppm	496	13,812	1,657	539	24,868
Standard seawater - 50,000 ppm	551	15,347	1,841	599	27,633

	Salinity TDS ppm	Conductivity k Ms/cm	Factor K/TDS μS/(cm*ppm)
South Pacific	<36,000	<51,660	1,43-1,44
Gran Canaria (Atlantic Ocean)	37,600	53,280	1,42
Sardinia (Mediterranean Sea)	40,800	57,240	1,40
Bahrain	42,500	59,350	1,40
Egypt (Red Sea)	44,000	62,990	1,38
Greece (Aegean Sea)	40,080	56,300	1,40

Πίνακας 3-4 Αλατότητα και αγωγιμότητα θαλασσινού νερού για διάφορες περιοχές

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

3.2 Παράμετροι λειτουργίας συστήματος αντίστροφης ώσμωσης

Στην ενότητα 2.5 αναπτύχθηκαν ορισμένες εξισώσεις και έννοιες που περιγράφουν την συμπεριφορά των μεμβρανών στην διεργασία της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση. Στην πράξη για τον σχεδιασμό ενός συστήματος αντίστροφης ώσμωσης, απαιτείται ο ορισμός των βασικών εννοιών σε επίπεδο συστήματος αυτήν την φορά, αφού ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να αποτελείται από πολλά στοιχεία μεμβρανών κατάλληλης διάταξης. Αυτές οι παράμετροι είναι ο βαθμός ανάκτησης του ακατέργαστου νερού, ο συντελεστής συμπύκνωσης, ο λόγος διέλευσης άλατος, ο λόγος απόρριψης άλατος, η ροή παραγόμενου νερού ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης.

- Ο **βαθμός ανάκτησης του ακατέργαστου νερού (ή λόγος ανάκτησης του νερού τροφοδοσίας-system recovery)** είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους λειτουργίας των συστημάτων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και στην πραγματικότητα είναι αυτή η παράμετρος με την οποία ξεκινάμε τον σχεδιασμό μιας μονάδας. Ορίζεται ως ο λόγος $Y\% = Q_p / Q_f$, όπου :
 Q_p : Η παροχή αφαλατωμένου νερού και

Q_f : Η παροχή νερού τροφοδοσίας της μονάδας

Την ανάκτηση του συστήματος πρακτικά την ρυθμίζουμε μέσω βαλβίδας, στην παροχή του απορριπτόμενου νερού (άλμη). Στα πιο σύνθετα συστήματα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού που περιλαμβάνουν και διατάξεις ανάκτησης ενέργειας η ρύθμιση μπορεί να είναι λίγο πιο σύνθετη, κατά βάση όμως καταλήγει να ελέγχεται κύρια από μία ρυθμιστική βαλβίδα στη έξοδο του συμπυκνώματος (απόρριψης).

Το ποσοστό ανάκτησης του συστήματος συνήθως ρυθμίζεται στο ανώτερο επίπεδο που μεγιστοποιεί την παροχή παραγόμενου νερού και παράλληλα αποτρέπει τις επικαθίσεις από υπερκορεσμένα άλατα εντός του συστήματος των μεμβρανών. Εξίσου σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι η πίεση του συστήματος καθώς και η συγκέντρωση σε άλατα του παραγόμενου νερού. Όσο το ποσοστό ανάκτησης μεγαλώνει, τόσο η συγκέντρωση του άλατος στη μεμβράνη, από την πλευρά της τροφοδοσίας, αυξάνει και έχει ως συνέπεια την αυξημένη ροή του άλατος στο παραγόμενο νερό. Η αυξημένη συγκέντρωση άλατος στη μεμβράνη αυξάνει και την οσμωτική πίεση και άρα, για σταθερή πίεση λειτουργίας, ελαττώνεται η παροχή παραγόμενου νερού.

- Ο **συντελεστής συμπύκνωσης (concentration factor) CF**, προκύπτει από τον λόγο ανάκτησης, με την υπόθεση ότι ο η απόρριψη άλατος στην παρακάτω εξίσωση είναι 100% :

$$CF = 1 / (1 - Y)$$
, όπου
 Y ο λόγος ανάκτησης εκφρασμένος σε δεκαδικό. Από το λόγο συμπύκνωσης είναι εύκολος ο υπολογισμός των επιμέρους ιόντων ή συνολικά της συγκέντρωσης σε άλατα της παροχής του συμπυκνώματος βάσει της αντίστοιχης συγκέντρωσης της παροχής τροφοδοσίας.
- Εξίσου σημαντικός όρος της διεργασίας της αντίστροφης ώσμωσης είναι ο **λόγος διέλευσης άλατος (salt passage ratio)**, ο οποίος ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$SP = 100\% (C_p / C_f)$$
, όπου:
 C_p : Η συνολική συγκέντρωση διαλυμένων συστατικών στο αφαλατωμένο νερό.
 C_f : Η συνολική συγκέντρωση διαλυμένων συστατικών στο ακατέργαστο νερό τροφοδοσίας.

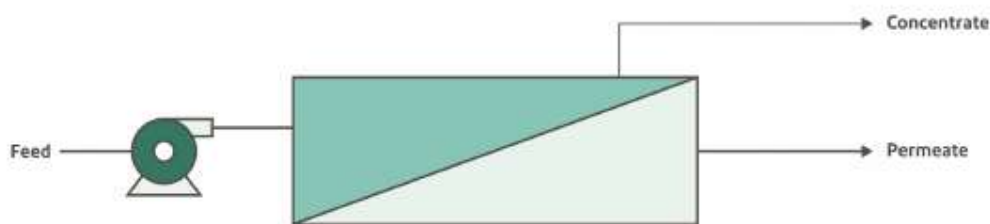
Ο λόγος διέλευσης άλατος αυξάνεται με τη μείωση της πίεσης του νερού τροφοδοσίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η μείωση της πίεσης μειώνει τη παροχή παραγόμενου νερού και επομένως η αραιώση των αλάτων, στην πλευρά του διηθήματος της μεμβράνης, μειώνεται (ο ρυθμός ροής των αλάτων διαμέσου της μεμβράνης παραμένει σταθερός, αφού δεν επηρεάζεται από την πίεση).

Το συμπληρωματικό του λόγου διέλευσης άλατος είναι ο **λόγος απόρριψης άλατος (salt rejection ratio)** που ορίζεται ως : $SR = 100\% - SP$.
- Σε μια μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους είναι η **μέση ροή διηθήματος (average permeate flux, APF)** ή ογκομετρική παροχή αφαλατωμένου νερού ανά μονάδα επιφάνειας μεμβράνης (m^3/m^2h). Ορίζεται ως ο λόγος παροχής αφαλατωμένου νερού προς τη συνολική επιφάνεια των μεμβρανών του συστήματος. Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας η παραπάνω παράμετρος αποτελεί απλώς μια μέση τιμή αφού σε ένα σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση κάθε στοιχείο μεμβράνης έχει διαφορετική παροχή παραγόμενου νερού.

3.3 Διατάξεις μεμβρανών σε συστήματα με αντίστροφη ώσμωση

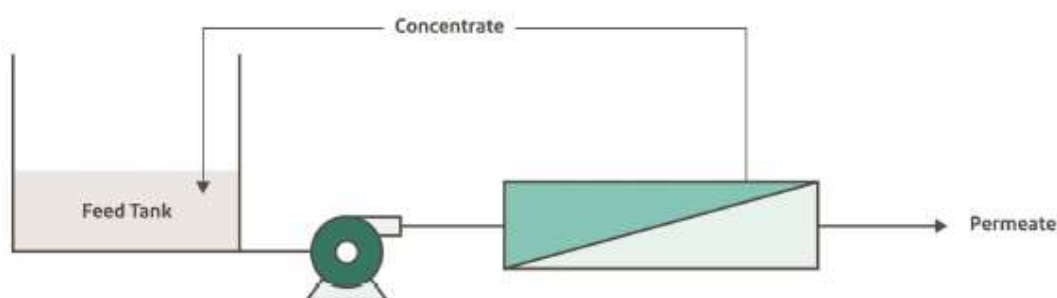
Γενικά σε ένα σύστημα με αντίστροφη ώσμωση υπάρχουν δύο κυρίαρχοι τρόποι λειτουργίας της μονάδας. Ο πιο συνηθισμένος είναι η συνεχής ροή ακατέργαστου νερού με ένα πέρασμα από τις μεμβράνες (Continuous RO process). Εναλλακτικά όταν η εφαρμογή το απαιτεί η τροφοδοσία ακατέργαστου νερού μπορεί να είναι διακοπτόμενη (Batch process), κάτι που συμβαίνει κυρίως στην επεξεργασία αστικών ή βιομηχανικών αποβλήτων, όπου μέρος της άλμης επιστρέφει σε μια δεξαμενή όπου αναμιγνύεται με το νερό τροφοδοσίας για να καλύψει τις

ασυνέχειες στην παροχή της τροφοδοσίας. Η σχηματική απεικόνιση των δύο αυτών διατάξεων φαίνεται στο σχήμα 3.1 και 3.2 (Dupont Technical Manual 2020).



Σχήμα 3-1 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης συνεχούς ροής

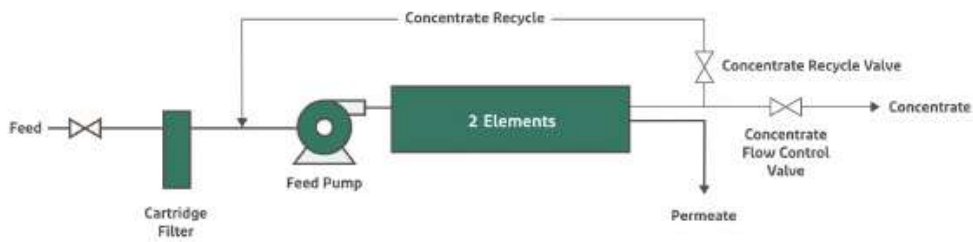
Πηγή : FilmTec™ReverseOsmosisMembranesTechnicalManual, April 2020



Σχήμα 3-2 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης διακοπτόμενης ροής

Πηγή : FilmTec™ReverseOsmosisMembranesTechnicalManual, April 2020

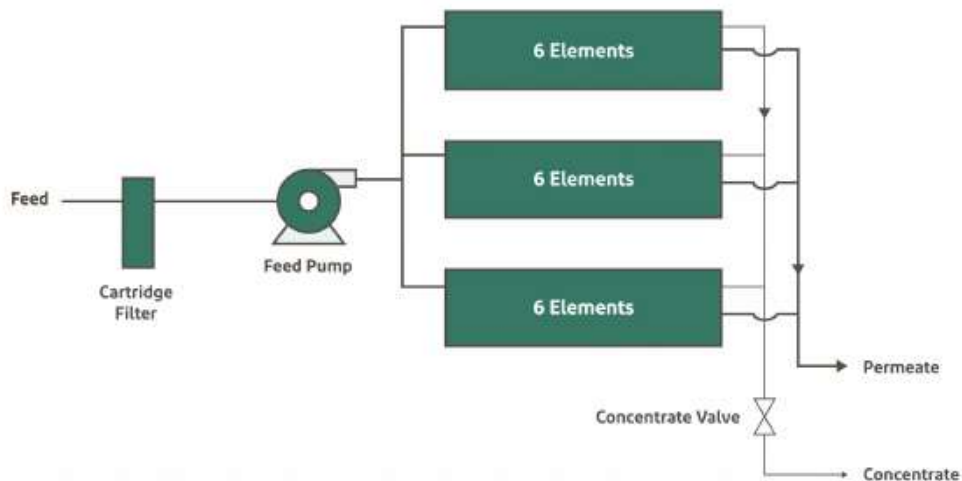
Ως προς το τρόπο διάταξης και εσωτερικής ανακυκλοφορίας ως βάση έχουμε το σύστημα με μία μεμβρανοθήκη που μπορεί να περιέχει έως και 8 μεμβράνες στη σειρά. Το αλμόλοιπο του 1ου στοιχείου γίνεται η τροφοδοσία του δεύτερου και ούτω καθεξής. Όλοι οι εσωτερικοί σωλήνες διηθήματος είναι συνδεδεμένοι και καταλήγουν σε ένα στόμιο στη μεμβρανοθήκη από όπου λαμβάνεται το διήθημα. Το στόμιο μπορεί να είναι προς την πλευρά της εισόδου της μεμβρανοθήκης ή προς την πλευρά του απορριπτόμενου νερού αλλά συνήθως πρακτικά λαμβάνεται από την ίδια πλευρά με του απορριπτόμενου. Σε ένα τόσο απλό και μικρό σύστημα συνήθως απαιτείται εσωτερική ανακυκλοφορία μέρους του συμπυκνώματος ώστε η ανάκτηση παραγόμενου νερού ανά στοιχείο μεμβράνης να είναι εντός των προδιαγραφών. Στο παρακάτω 3.3 σχήμα φαίνεται μια τέτοια διάταξη (Dupont Technical Manual 2020)



Σχήμα 3-3 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης μιας μεμβρανοθήκης

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

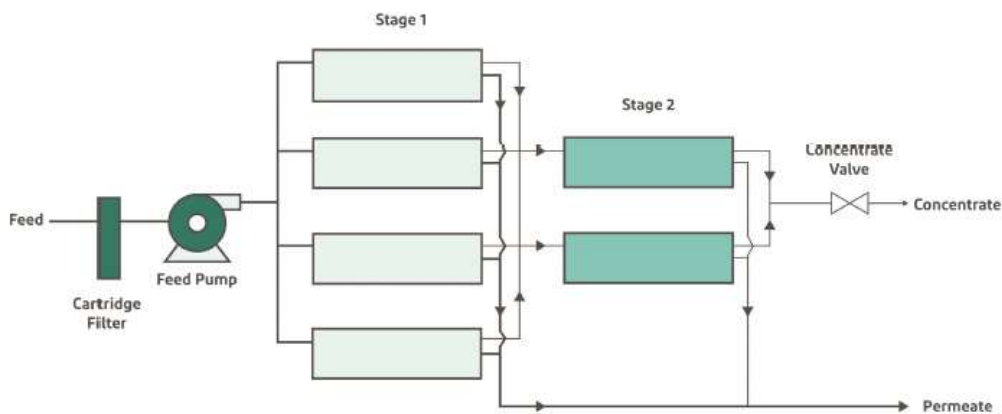
Συνήθως στις εφαρμογές ενός σταδίου έχουμε παράλληλη διάταξη των μεμβρανοθηκών και τις συναντάμε όταν ο βαθμός ανάκτησης είναι μικρότερος του 50%. Οι γραμμές τροφοδοσίας, παραγωγής αφαλατωμένου νερού και συμπυκνώματος συνδέονται σε συλλέκτες. Ένα παράδειγμα διάταξης ενός σταδίου φαίνεται στο σχήμα 3.4 όπου κάθε μεμβρανοθήκη περιέχει έξι στοιχεία μεμβρανών (Dupont Technical Manual 2020).



Σχήμα 3-4 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης ενός σταδίου

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

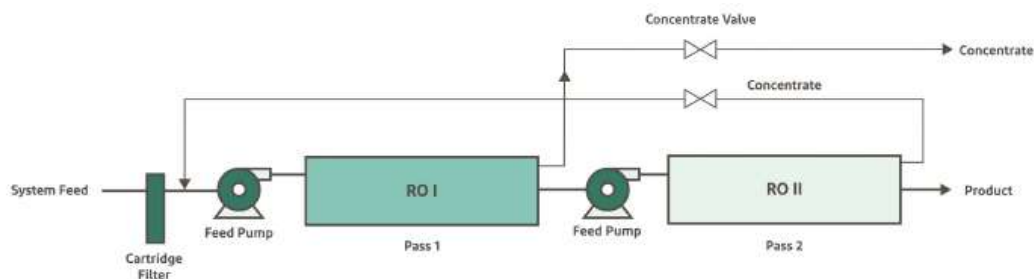
Τα συστήματα πολλαπλών σταδίων χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερους βαθμούς ανάκτησης και είναι ιδιαίτερα συνηθισμένα στην αντίστροφη ώσμωση υφάλμυρου νερού. Για να αντισταθμιστεί η παροχή του παραγόμενου νερού που απομακρύνεται ανά στάδιο και για να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της παροχής τροφοδοσίας ανά στάδιο, ο αριθμός των μεμβρανοθηκών ανά στάδιο μειώνεται προς την κατεύθυνση της παροχής τροφοδοσίας. Στο σχήμα 3.5 δίνεται ένα σύνηθες σύστημα δυο σταδίων με λόγο σταδίων 2:1. Ο λόγος σταδίων (staging ratio) για δύο διαδοχικά στάδια ορίζεται ως ο αριθμός των μεμβρανοθηκών του πρώτου προς των αριθμό των μεμβρανοθηκών του δεύτερου.



Σχήμα 3-5 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης δύο σταδίων (λόγος σταδίων 2:1)

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

Τέλος σε πιο ειδικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην βιομηχανία (τροφοδοσία ατμολεβήτων) και στην φαρμακοβιομηχανία, όπου η απαίτηση για υψηλής καθαρότητας νερό και μέγιστης απομάκρυνσης αλάτων εφαρμόζονται συστήματα αφαλάτωσης διπλού περάσματος. Το παραγόμενο νερό από την πρώτη διάταξη μεμβρανών γίνεται η τροφοδοσία μιας δεύτερης σε σειρά μονάδας αφαλάτωσης. Στο σχήμα 3.6 φαίνεται μια τέτοια περίπτωση με την διαφορά ότι συνηθίζεται η τροφοδοσία της δεύτερης μονάδας να συγκεντρώνεται σε δεξαμενή ή οποία είναι κατάλληλα προστατευμένη από σκόνη και μικροβιολογικές μολύνσεις.



Σχήμα 3-6 Διεργασία Αντίστροφης Ώσμωσης διπλού περάσματος

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

3.4 Διαδικασία σχεδιασμού συστήματος με αντίστροφη ώσμωση

Ξεκινώντας την σχεδίαση (conceptual design) μιας μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, ορίζουμε τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας με απλούς υπολογισμούς, χωρίς την βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων. Στην συνέχεια για να βελτιστοποιήσουμε την διεργασία και να ελέγξουμε την εφαρμοσιμότητα της σχεδιαστικής λογικής μας, απαιτείται η χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων που συνήθως παρέχονται από τους κατασκευαστές των μεμβρανών. Επιγραμματικά τα

βήματα που ακολουθούμε για να κάνουμε την αρχική σχεδίαση της μονάδας είναι τα εξής :

- Ανάλογα με τις ανάγκες του έργου, αναλύουμε την πηγή τροφοδοσίας της μονάδας και ορίζουμε βασικές παραμέτρους λειτουργίας όπως την ογκομετρική παροχή του νερού τροφοδοσίας την επιθυμητή ροή αφαλατωμένου νερού ανά μονάδα χρόνου και την ποιότητα που θέλουμε να έχει το τελικό προϊόν. Με βάση αυτά τα στοιχεία επιλέγουμε τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος αν θα είναι συνεχούς ή διακοπτόμενης λειτουργίας με διάταξη μονού ή πολλαπλών σταδίων, μονού ή διπλού περάσματος.
- Ανάλογα με την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (αλατότητα και προδιάθεση έμφραξης μεμβρανών), την απαιτούμενη απόρριψη και τις ενεργειακές απαιτήσεις, επιλέγουμε τον τύπο των μεμβρανών που θα χρησιμοποιήσουμε. Εν συνεχεία ορίζουμε και την μέση ροή διηθήματος ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας των μεμβρανών, συμβουλευόμενοι την εμπειρία του μελετητή και τα τεχνικά εγχειρίδια της εταιρείας κατασκευής των μεμβρανών.
- Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του αριθμού των μεμβρανών, N_E , που απαιτούνται. Ο αριθμός αυτός προκύπτει διαιρώντας την σχεδιαστική παροχή παραγόμενου νερού, Q_p , με την ροή σχεδιασμού f πολλαπλασιασμένη με την επιφάνεια της μεμβράνης, S_E , του επιλεγμένου στοιχείου της μεμβράνης. $N_E = Q_p / (f \cdot S_E)$. Ο αριθμός των μεμβρανών διαιρούμενος με τον αριθμό των μεμβρανών ανά μεμβρανοθήκη, μας δίνει τον απαιτούμενο αριθμό μεμβρανοθηκών (ο οποίος πρέπει να είναι ακέραιος).

Μετά από την ολοκλήρωση των παραπάνω σταδίων, ακολουθεί η ανάλυση και βελτιστοποίηση του συστήματος με το υπολογιστικό πρόγραμμα. Από το υπολογιστικό αυτό πρόγραμμα, που στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το ROSA 9.1, προκύπτουν τα υπόλοιπα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τη διαστασιολόγηση των αντλιών, του συστήματος ανάκτησης ενέργειας και τα οποία επαναλαμβάνονται για διάφορα σενάρια και με αλλαγές των επιμέρους βασικών μεταβλητών όπως η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού, η πίεση υψηλής λειτουργίας ώσπου να προκύψει ο βέλτιστος πλήρης σχεδιασμός του συστήματος αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση.

3.5 Κανονικοποίηση λειτουργικών παραμέτρων μεμβρανών

Κατά την λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, υπάρχουν παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση της, όπως για παράδειγμα η σύσταση του νερού τροφοδοσίας, η πίεση τροφοδοσίας των μεμβρανών, η θερμοκρασία και η ανάκτηση.

Προκειμένου να διακρίνουμε μεταξύ τέτοιων φυσιολογικών φαινομένων και μεταβολών της απόδοσης λόγω έμφραξης των μεμβρανών ή άλλων προβλημάτων σε αυτές, οι μετρούμενες παράμετροι της ροής του αφαλατωμένου νερού (permeate) και η απόρριψη αλάτων πρέπει να κανονικοποιηθούν. Η

κανονικοποίηση είναι μια μέθοδος σύγκρισης της πραγματικής απόδοσης της διεργασίας ως προς μια δεδομένη (ονομαστική) απόδοση αναφοράς. Κατά τα άλλα αυτή η απόδοση αναφοράς μπορεί να είναι η αρχικώς μετρούμενη απόδοση των μεμβρανών.

Αυτή η μέθοδος, δίνει την δυνατότητα στον μελετητή – εγκαταστάτη της μονάδας να έχει μια ξεκάθαρη εικόνα της λειτουργίας της από την πρώτη ημέρα και επιτρέπει την έγκαιρη παρέμβαση – διόρθωση για ένα βέλτιστο αποτέλεσμα. Η κανονικοποίηση μπορεί να γίνει είτε με υπολογιστικά προγράμματα που παρέχουν οι κατασκευαστές των μεμβρανών είτε εφαρμόζοντας τις εξισώσεις που παρέχονται από τα τεχνικά εγχειρίδια των μεμβρανών.

Στους πίνακες 3.5 και 3.6 παραθέτονται οι τυποποιημένοι όροι βάση τους οποίους γίνεται η κανονικοποίηση των παραμέτρων αυτών (Dupont Technical Manual 2020).

Πίνακας 3-5 Εξισώσεις σχεδιασμού συστήματος RO

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

Item	Equation	Equation Number
Permeate flow	$Q_p = A_p \pi_r S_E (TCF) (FF) \left(P_{ff} - \frac{\Delta P_{os}}{2} - P_{ps} - \bar{\pi} + \pi_{pf} \right)$	47
Average concentrate-side osmotic pressure	$\bar{\pi} = \pi_c \left(\frac{C_{fc}}{C_r} \right) \rho f$	48
Average permeate-side osmotic pressure	$\bar{\pi}_{ps} = \pi_c (1 - R_c)$	49
Ratio: arithmetic average concentrate-side to feed concentration for Element <i>i</i>	$\frac{C_{fc_i}}{C_{r_i}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{C_{ci}}{C_{r_i}} \right)$	50
Ratio: concentrate to feed concentration for Element <i>i</i>	$\frac{C_{ci}}{C_{r_i}} = \frac{1 - Y_i (1 - R_c)}{(1 - Y_i)}$	51
Feedwater osmotic pressure	$\pi_f = 1.12 (273 + T) \sum m_j$	52
Temperature correction factor for RO and NF membrane	$TCF = \text{EXP} \left[2640 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]; T \geq 25^\circ\text{C}$	53
	$TCF = \text{EXP} \left[3020 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]; T \leq 25^\circ\text{C}$	54
Concentration polarization factor for 8-inch elements	$\rho f_i = \text{EXP} [0.7 Y_i]$	55
System recovery	$Y = 1 - [(1 - Y_1)(1 - Y_2) \dots (1 - Y_n)] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i)$	56
Permeate concentration	$C_{p_f} = B(C_{r_c}) (\rho f_c) (TCF) \frac{S_E}{Q_p}$	57

Πίνακας 3-6 Ορισμοί Συμβόλων Εξισώσεων Σχεδιασμού

Πηγή : FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, April 2020

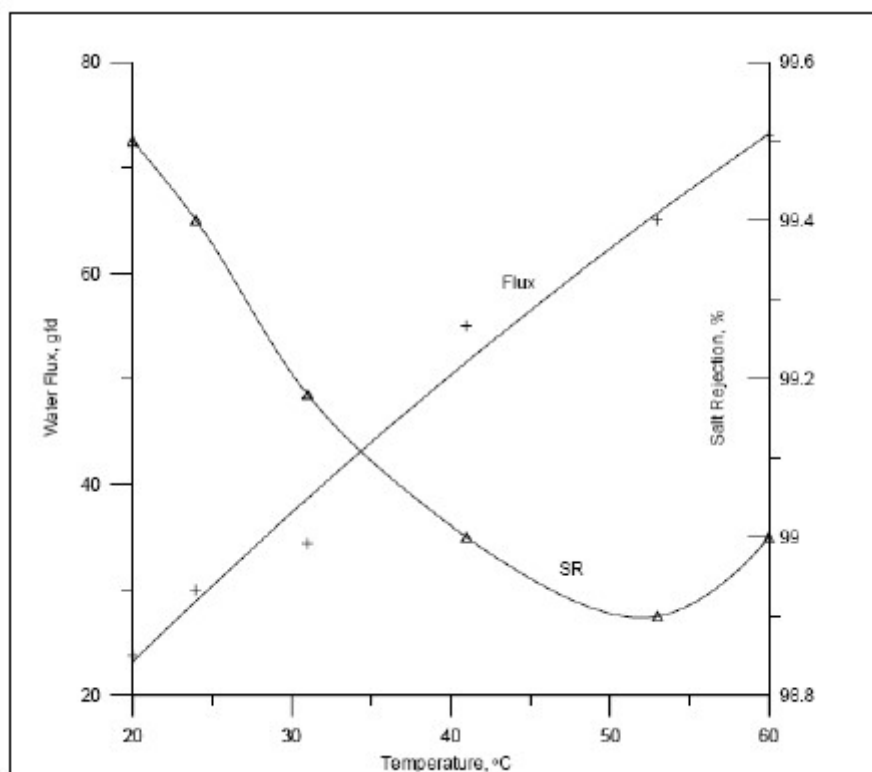
Q_j	permeate flow of Element i (gpd)	\sum_j	summation of all ionic species
$A_i \pi_i$	membrane permeability at 25°C for Element i , a function of the average concentrate-side osmotic pressure (gpd/psi)	Y	system recovery (expressed as a fraction) = permeate flow/feed flow
S_E	membrane surface area per element (ft ²)	$\prod_{i=1}^n$	multiplication of n terms in a series
TCF	temperature correction factor for membrane permeability	n	number of elements in series
FF	membrane fouling factor	Q	system permeate flow (gpd)
P_{fi}	feed pressure of Element i (psi)	N_E	number of elements in system
$\Delta P_{fc i}$	concentrate-side pressure drop for Element i (psi)	\bar{Q}_i	average element permeate flow (gpd) = Q_i/N_E
P_{pi}	permeate pressure of Element i (psi)	$\bar{A} \pi$	average membrane permeability at 25°C, a function of the average concentrate-side osmotic pressure (gpd/psi)
π_c	average concentrate-side osmotic pressure (psi)	\bar{C}_{fc}	average concentrate-side concentration for system (ppm)
π_{fi}	feed osmotic pressure of Element i	\bar{R}	average fractional salt rejection for system
π_{pi}	permeate-side osmotic pressure of Element i (psi)	$\bar{\pi}$	average concentrate-side osmotic pressure for system (psi)
ρ_{fi}	concentration polarization factor for Element i	$\Delta \bar{P}_{fc}$	average concentrate-side system pressure drop (psi)
R_i	salt rejection fraction for Element i = $\frac{\text{feed conc.} - \text{perm. conc.}}{\text{feed conc.}}$	Y_L	limiting (maximum) system recovery (expressed as a fraction)
$C_{fc i}$	average concentrate-side concentration for Element i (ppm)	\bar{Y}_i	average element recovery (expressed as a fraction)
C_{fi}	feed concentration for Element i (ppm)	$\bar{\rho}_{fi}$	average concentration polarization factor
C_{ci}	concentrate concentration for Element i (ppm)	\bar{q}_{fc}	arithmetic average concentrate-side flowrate (gpm) [= (1/2)(feed flow + concentrate flow)]
Y_i	recovery fraction for Element i = $\frac{\text{permeate flow}}{\text{feed flow}}$	N_V	number of six-element pressure vessels in system (= $N_v/6$)
π_f	treated feedwater osmotic pressure (psi)	N_{V1}	number of pressure vessels in first stage of 2-stage system (= 1/3 N_v)
T	feedwater temperature (°C)	N_{V2}	number of pressure vessels in second stage of 2-stage system (= $N_v/3$)
m_j	molal concentration of j^{th} ion species	$N_{V/R}$	stage ratio (= N_{v1}/N_{v2})

Από τις παραπάνω εξισώσεις οι πλέον σημαντικότερες προς κανονικοποίηση είναι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας, TCF, η ωσμωτική πίεση, π_f , και η συγκέντρωση διαλυμένων στερεών (TDS) του παραγόμενου νερού, C_{pf} .

3.6 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην διεργασία της αφαλάτωσης

Μια παράμετρος που επηρεάζει καθοριστικά την διεργασία της αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση είναι η θερμοκρασία. Η θερμοκρασία είναι μια μεταβλητή παράμετρος του νερού τροφοδοσίας που παρουσιάζει διακυμάνσεις από περιοχή σε περιοχή και την μια εποχή στην άλλη.

Οι κατασκευαστές των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης δίνουν κάποια ανώτατα επιτρεπτά όρια θερμοκρασίας νερού τροφοδοσίας (μέχρι και 45°C). Ο ρυθμός ροής του νερού που διαπερνά τη μεμβράνη αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (περίπου 3% για κάθε βαθμό κελσίου), ενώ το ίδιο συμβαίνει και με τη συγκέντρωση των αλάτων στο παραγόμενο νερό όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7 Αυτό ερμηνεύεται από την μείωση του ιξώδους του νερού λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας και έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού διάχυσης του διαλύματος τροφοδοσίας δια μέσου της μεμβράνης.



Σχήμα 3-7 Απόρριψη αλάτων και ροή νερού σε συνάρτηση της θερμοκρασίας

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

Σε ένα σύστημα αφαλάτωσης, εάν αυξήσουμε την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, διατηρώντας σταθερό τον ρυθμό ροής παραγόμενου αφαλατωμένου νερού, τότε η πίεση που θα χρειαστεί να εφαρμόσουμε θα είναι μικρότερη και κατά συνέπεια θα χρειαζόμαστε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Θα έχουμε λοιπόν μικρότερο κόστος λειτουργίας, λιγότερα στοιχεία μεμβρανών και μεγαλύτερο λόγο ανάκτησης.

Η αύξηση όμως της θερμοκρασίας συνεπάγεται και ορισμένες αρνητικές συνέπειες για την μονάδα αφαλάτωσης και αυτές έχουν να κάνουν με την μικροβιακή δραστηριότητα, την διάβρωση και τις επικαθίσεις αλάτων στα μεταλλικά εξαρτήματα, τις σωληνώσεις και τις αντλίες κυκλοφορίας. Κατά συνέπεια θα πρέπει να κρατείται μια ισορροπία της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας έτσι ώστε να αποφεύγονται οι αρνητικές επιδράσεις της με βάση τον εξοπλισμό που έχουμε

εγκαταστήσει στην μονάδα και να λαμβάνονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι θετικές επιδράσεις της κυρίως όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Αντιμετώπιση λειτουργικών προβλημάτων

4.1 Μείωση της απόδοσης των μεμβρανών

Στις μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση συχνά παρατηρείται το φαινόμενο της έμφραξης των μεμβρανών, το οποίο συνεπάγεται την μείωση της απόδοσης ολόκληρης της μονάδας και σε ορισμένες περιπτώσεις, σε συνδυασμό με το πέρασ του χρόνου, συνεπάγεται για τις μεμβράνες να χάνουν την λειτουργικότητά τους. Το φαινόμενο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αφενός να μειώνει την παραγωγικότητα της μονάδας και την ποιότητα του αφαλατωμένου νερού και αφετέρου να αυξάνει το κόστος του καθαρού νερού που παράγεται. Στην πραγματικότητα ανάλογα την περίπτωση την οποία μελετάμε (σχετικά με την σύσταση του νερού τροφοδοσίας και της προκατεργασίας την οποία δέχεται), το φαινόμενο της έμφραξης των μεμβρανών φέρει και διαφορετικά αποτελέσματα για τις μεμβράνες και κατ' επέκταση διαφορετική αντιμετώπιση.

Έχει παρατηρηθεί ότι, όταν έχει φθαρεί ή έχει υποστεί μόνιμες αλλοιώσεις το πολυμερές υλικό της μεμβράνης, τότε η ζημία που έχει προκληθεί είναι μη αντιστρέψιμη όσον αφορά την μείωση της απόδοσης της μεμβράνης, ενώ όταν ένας ρυπογόνος παράγοντας, για παράδειγμα άλατα, έχουν αφομοιωθεί από την επιφάνεια της μεμβράνης, τότε συνήθως η απόδοση επανέρχεται στο μεγαλύτερο ποσοστό της ή και πλήρως. Η μείωση της απόδοσης των μεμβρανών, με το πέρασ του χρόνου οφείλεται κυρίως στους εξής παράγοντες :

- ρυπαντές (άλατα, μικρόβια, οργανικά μακρομόρια κλπ)
- χημικά της προεπεξεργασίας (Cl₂, H₂SO₄ κλπ)
- χημικά καθαρισμού των μεμβρανών (NaOH, HCl, H₃PO₄ κλπ)
- θερμοκρασία (εκτός προδιαγραφόμενων ορίων)
- πίεση (εκτός προδιαγραφόμενων ορίων)

Η μείωση της απόδοσης των μεμβρανών μπορεί να οφείλεται είτε σε φυσικά είτε σε χημικά αίτια. Στο νερό τροφοδοσίας του συστήματος υπάρχουν ουσίες, οι οποίες δύναται να φράξουν τους πόρους της μεμβράνης (fouling – έμφραξη). Γι' αυτόν κυρίως τον λόγο σε μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης υπάρχει και το στάδιο της προκατεργασίας κατά την οποία απομακρύνεται ένα μεγάλο μέρος των δυσμενών ουσιών που προκαλούν την έμφραξη, όχι όμως το σύνολό τους. Επίσης οι μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση λειτουργούν σε πολύ υψηλές πιέσεις με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να υποστούν βαθμιαία παραμόρφωση λόγω τάνυσης ή συμπίεσης-σύνθλιψης.

Τα χημικά αίτια τα οποία οδηγούν σε φαινόμενα έμφραξης των μεμβρανών σε μια διεργασία αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, έχουν να κάνουν κυρίως με το pH, την θερμοκρασία και τα οξειδωτικά μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται στο στάδιο της προκατεργασίας. Εάν αυτοί οι παράγοντες αυξηθούν σε σημείο όπου ξεπεράσουν τα όρια λειτουργίας των μεμβρανών, τότε παρατηρούνται σημαντικά προβλήματα έμφραξης και μείωσης της απόδοσης της μονάδας. Επίσης πολύ μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στους κύκλους καθαρισμού των μεμβρανών με δραστικά χημικά μέσα, καθώς αυτά μπορεί να μειώσουν σημαντικά τον χρόνο ζωής των μεμβρανών, μέσω μηχανισμών οξείδωσης και γενικότερης καταπόνησης των πολυμερών από τα οποία κατασκευάζεται η μεμβράνη.

Η μείωση της απόδοσης ή ακόμα και η ολική αναποτελεσματικότητα μια μεμβράνης μπορεί να γίνει αντιληπτή με την μέτρηση ορισμένων βασικών παραμέτρων, όπως η ροή αφαλατωμένου νερού, η συγκέντρωσή του σε άλατα καθώς και η πτώση πίεση της ροής διαμέσου της μεμβράνης. Κατά συνέπεια, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των βασικών μεταβλητών για να μπορεί να γίνει η σύγκριση με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Η ροή του νερού στην κατεύθυνση της μεμβράνης εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη πίεση και την αντίσταση της ίδιας της μεμβράνης στην ροή νερού προς αφαλάτωση. Στην αρχή της λειτουργίας μια μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση η αντίσταση την οποία προκαλεί η μεμβράνη είναι αρχικά χαμηλή και η ροή αφαλατωμένου νερού είναι η προβλεπόμενη από τον σχεδιασμό. Με το πέρασ του χρόνου η αντίσταση αυξάνεται, ως αποτέλεσμα της ρύπανσης της μεμβράνης και του περιορισμού του μεγέθους των πόρων, φαινόμενο το οποίο προκαλεί σταδιακή μείωση του ρυθμού ροής καθαρού νερού. Καθώς λοιπόν μειώνεται το μέγεθος των πόρων αυξάνεται και η πτώση πίεσης κατά την ροή διαμέσου της μεμβράνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αντλία κυκλοφορίας υψηλής πίεσης να λειτουργεί σε υψηλότερο σημείο στην καμπύλη λειτουργία της και κατά συνέπεια να καταναλώνει και περισσότερο ρεύμα.

4.1.1 Το φαινόμενο της έμφραξης (fouling) των μεμβρανών στην αντίστροφη ώσμωση

Το φαινόμενο της έμφραξης περιγράφει μια κατάσταση κατά την οποία μια μεμβράνη υφίσταται στένωση των πόρων της ή επικάλυψη των πόρων με τρόπο, ώστε ο ρυθμός ροής του παραγόμενου νερού να μειώνεται. Κατά αυτή την έννοια το φαινόμενο της έμφραξης αποτελεί ένα επιφανειακό φαινόμενο, όπου τα μοριακά είδη που την προκαλούν συγκεντρώνονται στην επιφάνεια της μεμβράνης με φυσικές δυνάμεις και όχι με χημική αντίδραση.

Στην διεθνή βιβλιογραφία για να περιγραφεί το φαινόμενο της έμφραξης χρησιμοποιούνται οι όροι fouling και scaling. Ο πρώτος όρος (fouling) χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την ρύπανση από τα άλατα του νερού τροφοδοσίας, την ρύπανση από μικροοργανισμούς (biofouling), τη ρύπανση από κολλοειδή στερεά (Colloidal fouling) ή οργανικές ενώσεις (Organic fouling), και την ρύπανση που προκαλείται από μοριακά είδη που προκύπτουν ή προέρχονται από

την διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης (π.χ. πυριτικά άλατα, οξείδια μετάλλων κλπ). Ο δεύτερος όρος (scaling), περιγράφει την έμφραξη που οφείλεται σε ανόργανα άλατα (Inorganic fouling). Στην ελληνική βιβλιογραφία οι όροι fouling και scaling εκφράζονται από τον όρο έμφραξη.

Ειδικότερα σε μια διεργασία αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, όπου το νερό τροφοδοσίας είναι θαλασσινό, παρατηρείται το φαινόμενο της έμφραξης από βιολογική και σωματιδιακή ύλη, ενώ όταν η μονάδα τροφοδοτείται με υφάλμυρο νερό, μολύνεται και από διαλυμένα ανόργανα άλατα. Μια μεταβλητή που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ικανότητα του νερού να μολύνει τις μεμβράνες, είναι ο δείκτης πυκνότητας άλατος –SDI (Silt Density Index). Το SDI περιγράφει την διαδικασία όπου νερό υπό σταθερή πίεση περνάει μέσα από φίλτρο-μεμβράνη 0.45μm και περιγράφεται στην πρότυπη μέθοδο ASTM D4189 /22/.

Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του SDI είναι ο παρακάτω :

$$SDI_T = \left(1 - \frac{t_i}{t_f}\right) \times \frac{100}{T}$$

όπου :

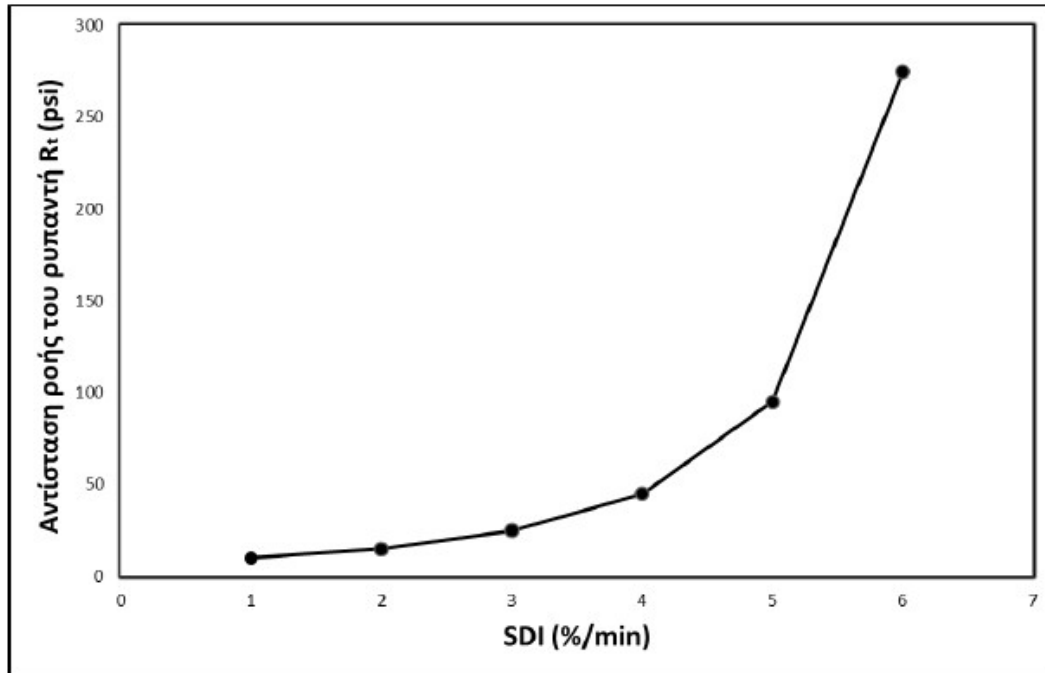
T= ο συνολικός χρόνος της ροής (συνήθως επιλέγουμε 15 min)

t_i = ο χρόνος που απαιτείται για να συλλέξουμε 500ml παραγόμενου νερού στην αρχή του πειράματος (sec)

t_f = ο χρόνος που απαιτήθηκε για να συλλέξουμε 500ml παραγόμενου νερού μετά από χρόνο T (sec)

Στην συγκεκριμένη μέθοδο, ο όρος $\left(1 - \frac{t_i}{t_f}\right)$, δεν πρέπει να ξεπερνάει την τιμή 0.75. Αν συμβαίνει αυτό τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μικρότερο T. Ένα SDI ≤ 3 είναι ικανοποιητικό για μια μονάδα αφαλάτωσης. Παρόλα αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις γίνονται ανεκτές τιμές του SDI μεταξύ 4 και 5.

Οι Kremen και Tanner συσχέτισαν τον παράγοντα SDI με την συνολική αντίσταση ροής (R_t), που ορίζεται από την αντίσταση ροής της μεμβράνης (R_p) και την αντίσταση ροής του ρυπαντή (R_f). Στο παρακάτω σχήμα (4.1) εμφανίζεται η εκθετική σχέση μεταξύ SDI και R_t και παρατηρείται ότι για τιμές SDI μεταξύ 4 και 5 έχουμε πολύ μεγαλύτερη αντίσταση ροής από τιμές μεταξύ 1 έως 4. Κατά συνέπεια σε μια ιδανική συνθήκη λειτουργίας μια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης, όπου κατά το στάδιο της προκατεργασίας η τιμή του SDI πέσει κάτω από 4 (ιδανικά 1-2), θα έχουμε σαν αποτέλεσμα νερό με μικρότερη τάση ρύπανσης από αυτό που θα μας παρείχε ένα σύστημα με SDI 3-5.



Σχήμα 4-1 Η επίδραση της αύξησης του SDI στην αντίσταση ροής

Πηγή : Α.Υφαντής, Σχεδιασμός μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, 2011

Ένας παρόμοιος δείκτης με τον SDI είναι ο MFI (Modified fouling index), ο οποίος μας παρέχει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον SDI, είναι όμως πιο δύσκολος στον υπολογισμό του. Η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό του MFI είναι παρόμοια με αυτήν που περιγράφηκε παραπάνω με την διαφορά ότι η ροή του παραγόμενου νερού μετριέται σε διαστήματα των 30 δευτερολέπτων για 15 λεπτά φιλτραρίσματος, ενώ στο διάστημα αυτό συλλέγονται δεδομένα για τον ρυθμό ροής νερού και για τα διαστήματα του χρόνου που απαιτείται για να συλλεχθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού. Για την καλύτερη κατανόηση του συγκεκριμένου πειράματος οι J.C. Schippers and J. Verdouw διατύπωσαν την παρακάτω εξίσωση από την οποία η κλίση της μας δίνει την τιμή του MFI.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \times R_m}{\Delta P \times A} + \frac{\mu \times \alpha \times C_b}{2 \times \Delta P \times A^2} \times V$$

Η παραπάνω εξίσωση βασίζεται στο μοντέλο των αντιστάσεων εν σειρά και θεωρεί ότι η αντίσταση ροής βασίζεται στην δημιουργία ενός στρώματος cake στην επιφάνεια της μεμβράνης. Από αυτή την εξίσωση λοιπόν προκύπτει και ο υπολογισμός του MFI :

$$MFI = \frac{\mu \times \alpha \times C_b}{2 \times \Delta P \times A^2}$$

όπου :

ΔP = η πτώση πίεσης διαμέσου της μεμβράνης (Pa)

M = το ιξώδες του νερού (Pa s)

R_m = η υδραυλική αντίσταση των μεμβρανών (m^{-1})

α = η αντίσταση του στρώματος cake στην μεμβράνη (m/kg)

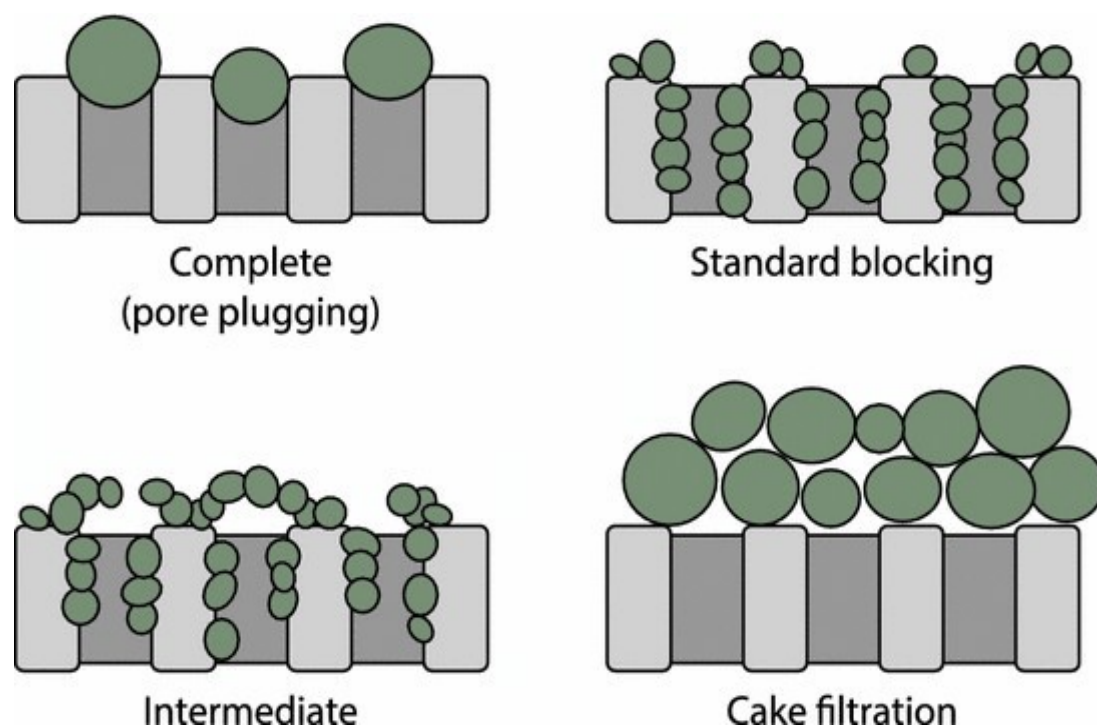
A = η επιφάνεια της μεμβράνης (m^2)

V = ο όγκος (L)

C_b = η συγκέντρωση των σωματιδίων στο νερό τροφοδοσίας (kg/m^3)

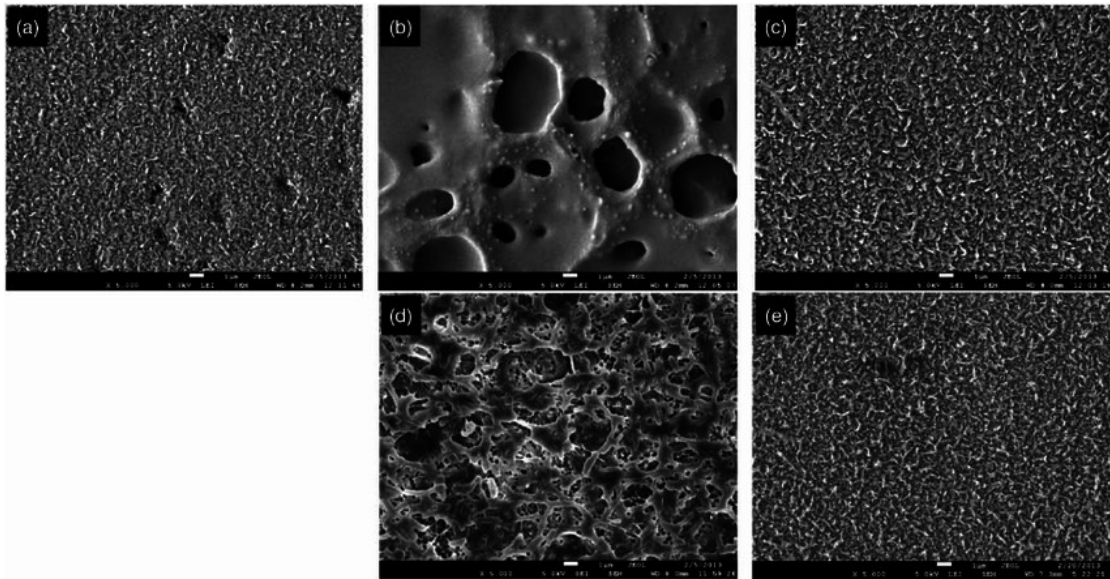
Οι κατασκευαστές των μεμβρανών προτείνουν συνήθως μια τιμή για το $MFI < 1s/L^2$ και μέγιστη τα $4s/L^2$. Στην πράξη ο υπολογισμός του παράγοντα MFI είναι αρκετά πολύπλοκος όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και γι' αυτό τον λόγο συνήθως υπολογίζεται το SDI.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι τρόποι φραγής της επιφάνειας μιας μεμβράνης (Εικόνα 4.1) καθώς και ορισμένες εικόνες έμφραξης μεμβρανών από SEM (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4-1 Μηχανισμοί έμφραξης (fouling) των μεμβρανών

Πηγή : Fouling in Membrane Bioreactors, Bradley Paul Ladewig, Muayad Al-Shaeli, October 2017



Εικόνα 4-2 Απεικόνιση από SEM μεμβρανών (a) στην αρχή της λειτουργίας τους, (b) φραγμένες, (c)μετά από καθαρισμό με συγκεκριμένο πολυμερές, (d)φραγμένες και (e) μετά από καθαρισμό με διαφορετικό πολυμερές

Πηγή : Synthetic organic polymer fouling in municipal wastewater reuse reverse osmosis, Yuli Ekowati, Massgrave Msuya, Sergio G. Salinas-Rodriguez, G. Veenendaal, September 2014

4.1.2 Μέτρα πρόληψης κατά του φαινομένου της έμφραξης των μεμβρανών - Χημικοί καθαρισμοί

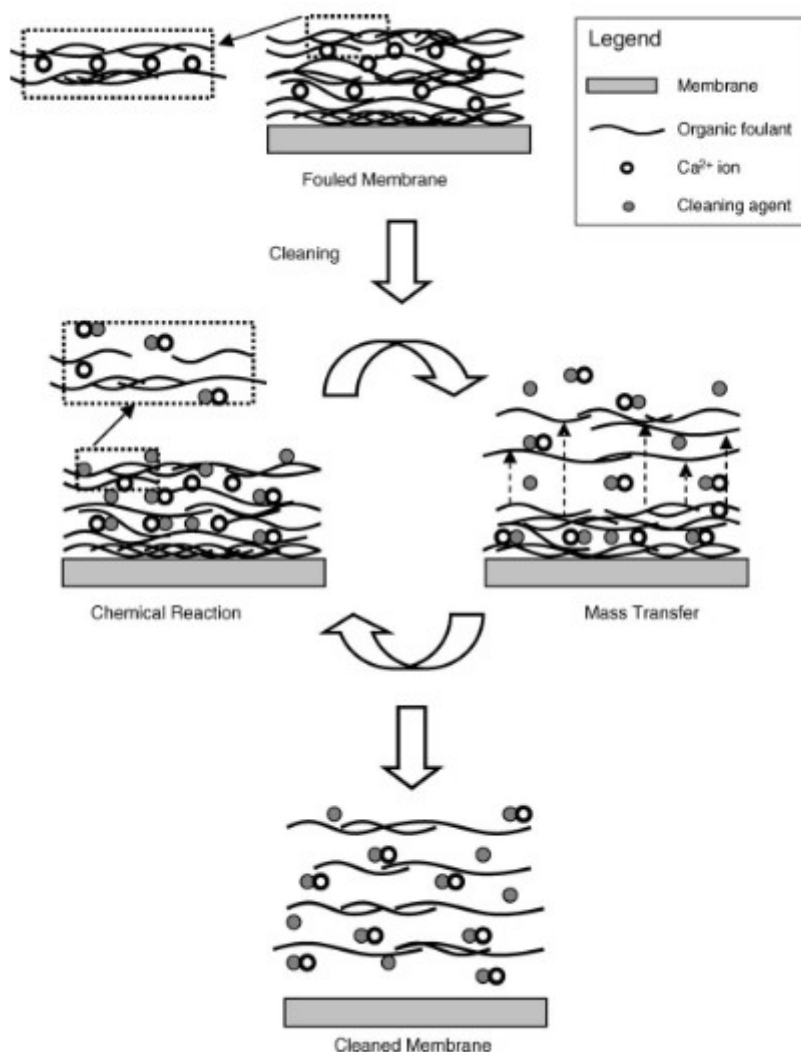
Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια η κανονικοποίηση των βασικών μεταβλητών που περιγράφουν μια διεργασία αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, μας βοηθά ιδιαίτερα και στην παρακολούθηση της μονάδας, με στόχο πάντα να έχουμε μια βέλτιστη λειτουργία όσον αφορά την επιθυμητή ροή παραγόμενου νερού και την ποιότητα του. Κατά συνέπεια η συστηματική παρακολούθηση της μονάδας μέσω των κανονικοποιημένων μεταβλητών λειτουργίας, μας επιτρέπει να ορίζουμε έγκαιρα τις διορθωτικές ενέργειες ή και τον προγραμματισμό χημικών καθαρισμών που θα χρειαστούν σε περιπτώσεις έμφραξης των μεμβρανών.

Καθώς όμως κάθε τύπος έμφραξης έχει και διαφορετικά χαρακτηριστικά, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι, είναι αναγκαίο να μπορεί να εκτιμηθεί το είδος της έμφραξης και να προγραμματιστούν οι ανάλογες ενέργειες στο επίπεδο κυρίως της προκατεργασίας αλλά και της προσαρμογής του βαθμού ανάκτησης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα κρίνεται αναγκαίο να γίνεται αυτοψία της μεμβράνης που έχει υποστεί έμφραξη, έτσι ώστε να αναγνωριστούν οι αιτίες που την προκάλεσαν, μιας και σε πολλές περιπτώσεις γίνονται αντιληπτές δια γυμνού οφθαλμού. Παρόλα αυτά η αυτοψία της μεμβράνης πρέπει να αποτελεί την έσχατη λύση μιας και καταστρέφεται μια μεμβράνη για να διαπιστωθεί το πρόβλημα η οποία στην συνέχεια αντικαθίσταται.

Αφού διαπιστωθεί φαινόμενο έμφραξης σε μια μεμβράνη RO προγραμματίζεται η διαδικασία χημικού καθαρισμού του συστήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις κατά το σχεδιασμό και την αρχική λειτουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης προγραμματίζονται εκ των προτέρων περιοδικοί χημικοί καθαρισμοί μιας και η διαδικασία αυτή παρέχεται κατευθείαν από πρωτόκολλα των κατασκευαστών των μεμβρανών, οι οποίοι έχουν εξειδικεύσει ανά περίπτωση εγκατάστασης το είδος του χημικού που θα χρησιμοποιηθεί και την περιοδικότητα της διαδικασίας. Έτσι στην πραγματικότητα κατά τη λειτουργία μιας μονάδας που παρατηρούνται φαινόμενα έμφραξης, η απόδοση των χημικών καθαρισμών προκύπτει βάσει δοκιμής και σφάλματος, αφού οι συνθήκες αλλάζουν ανά περίπτωση.

Ένας χημικός καθαρισμός μεμβράνης αλληλεπιδρά με τον ρυπαντή τόσο χημικά όσο και φυσικά. Γίνεται ανακυκλοφορία του χημικού στην εγκατάσταση των μεμβρανών και καθώς τα χημικά έρχονται σε επαφή με το στρώμα της μεμβράνης που έχει υποστεί έμφραξη, παρατηρείται χημική δράση μεταξύ του διαλύματος καθαρισμού και των ρυπαντών καθώς και μεταφορά μάζας τόσο από το διάλυμα καθαρισμού προς τους ρυπαντές, όσο και από το στρώμα έμφραξης προς το ίδιο το διάλυμα (Εικόνα 4.3)



Εικόνα 4-3 Σχηματική απεικόνιση καθαρισμού μεμβράνης η οποία έχει υποστεί οργανική έμφραξη

Πηγή : Salt cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes, Sangyoun Lee, M. Elimelech, 2007

Στο πρακτικό επίπεδο κατά την διάρκεια του χημικού καθαρισμού χρησιμοποιούνται όξινα και / ή βασικά χημικά. Τα πιο συνήθη όξινα διαλύματα (pH-2) είναι το υδροχλωρικό οξύ, το φωσφορικό οξύ, το υδρόθειικό νάτριο ($\text{NH}_2\text{SO}_3\text{H}$) και το σουλφαμικό οξύ, ενώ τα πιο συνήθη βασικά – αλκαλικά χημικά (pH-12) είναι το λαυρυλοθειικό νάτριο, το υδροξείδιο του νατρίου, το αιθυλενοδιαμινοτετραοξικό οξύ (Na_4EDTA). Τα περισσότερα διαλύματα καθαρισμού χρησιμοποιούνται σε συγκεντρώσεις από 0.03-2.00% κ.β.

4.2 Διαβρώσεις μεταλλικών μερών

Σε μια μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση και γενικότερα όπου χρησιμοποιείται σαν μέσο το θαλασσινό νερό πρέπει να δίνεται πάρα πολύ μεγάλη σημασία στα υλικά που χρησιμοποιούνται λόγω της πολύ έντονης διαβρωτικότητας του ίδιου του μέσου, που αν δεν προσεχθεί μπορεί να δημιουργήσει μεγάλα προβλήματα στην λειτουργία της μονάδας.

Για τον λόγο αυτό όταν το νερό τροφοδοσίας σε μια μονάδα αφαλάτωσης είναι θαλασσινό, τότε τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως ανοξείδωτοι χάλυβες. Παρόλα αυτά το φαινόμενο της διάβρωσης είναι συχνό σε τέτοιες περιπτώσεις και κυρίως στις αντλίες κυκλοφορίας του θαλασσινού νερού, των σωληνώσεων και των λοιπών μεταλλικών εξαρτημάτων.

Αρχικά παρόλο που οι αντλίες κυκλοφορίας που σαν μέσο τους δέχονται και θαλασσινό νερό, αποτελούνται (τα βρεχούμενα τους μέρη) από ανοξείδωτο χάλυβα, με το πέρασ του χρόνου παρουσιάζουν φαινόμενα διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται το φαινόμενο της ρευστομηχανικής διάβρωσης, όπου λόγω της υψηλής αγωγιμότητας του νερού, εκεί που η αντλία έχει υποστεί μια μηχανική ζημιά, καταστρέφεται το επιφανειακό στρώμα το οποίο αποτελείται από προστατευτικά υλικά έναντι της διάβρωσης (συνήθως οξείδια του βρωμίου). Αυτή η περιοχή είναι πλέον είναι περισσότερο ευάλωτη στην διάβρωση από τα υπόλοιπα μέρη της αντλίας δημιουργώντας έτσι ένα γαλβανικό μακροστοιχείο, όπου η άνοδος είναι το κομμάτι της αντλίας που διαβρώνεται. Η ρευστομηχανική διάβρωση δημιουργείται στην πραγματικότητα από τα διάφορα στερεά σωματίδια που μεταφέρονται στο νερό και προσκρούοντας στην επιφάνεια της αντλίας δημιουργούν κοιλότητες “γυμνές” από το προστατευτικό γαλβάνι έναντι της διάβρωσης.

Επιπλέον ένα πολύ συχνό φαινόμενο διάβρωσης που παρατηρείται συχνά στις αντλίες (όχι μόνο στις αφαλατώσεις αλλά και σε κοινές εφαρμογές), είναι αυτό της σπηλαιώδους διάβρωσης. Στην περίπτωση αυτή και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού στη μάζα του νερού, οι οποίες όταν

έρθουν σε ρήξη προκαλούν διάβρωση με την μορφή σπηλαίων στα προσβαλλόμενα μέρη της αντλίας. Το φαινόμενο αυτό συνήθως περιγράφεται και ως σπηλαίωση (εικόνα 4.4).



Εικόνα 4-4 Το φαινόμενο της σπηλαίωσης σε μια φυγοκεντρική αντλία

Πηγή : <https://arpedon.com/el/blog>

Πολύ συχνά παρατηρούνται φαινόμενα διάβρωσης στις σωληνώσεις και στα μεταλλικά εξαρτήματα μια μονάδας αφαλάτωσης.

Πιο συγκεκριμένα λόγω της παρουσίας διαλυμένου οξυγόνου στο νερό δημιουργείται στοιχείο διάβρωσης με το οξυγόνο να αποτελεί την κάθοδο (ηλεκτροχημική διάβρωση). Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία τόσο λιγότερη ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου παρατηρείται σε αυτό. Στις αφαλατώσεις η θερμοκρασία του νερού είναι ασφαλώς χαμηλή με αποτέλεσμα η παρουσία οξυγόνου να είναι σχετικά μεγάλη και να προκαλεί συχνά προβλήματα.

Ένα άλλο φαινόμενο διάβρωσης που παρατηρείται σε βρεχούμενα μέρη-εξαρτήματα από θαλασσινό νερό είναι αυτό της περικρυσταλλικής διάβρωσης. Το παραπάνω φαινόμενο λαμβάνει χώρα κατά μήκος των κόκκων του ανοξειδωτου χάλυβα, χωρίς όμως οι κόκκοι να διαβρώνονται. Στην πράξη δημιουργούνται γαλβανικά στοιχεία λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης χρωμίου στα όρια των κόκκων σε σχέση με το εσωτερικό τους. Στις αφαλατώσεις το φαινόμενο λαμβάνει χώρα κυρίως στις περιοχές που συγκολλούνται οι σωληνώσεις λόγω της θερμικής καταπόνησης που δέχονται. Τέλος όπως και στις αντλίες έτσι και στα υπόλοιπα μέρη της εγκατάστασης όπου κυκλοφορεί νερό παρατηρείται και το φαινόμενο της ρευστομηχανικής διάβρωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Το παράδειγμα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix (150 m³/day)

5.1 Στόχοι Σχεδιασμού

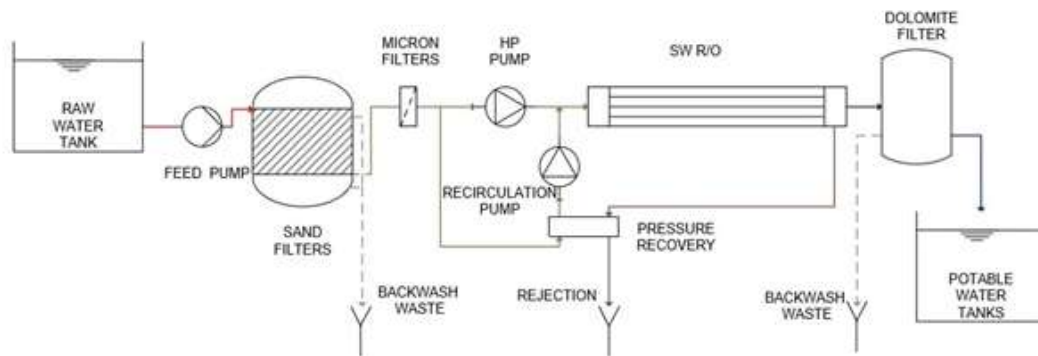
Στόχος του σχεδιασμού ήταν η κατασκευή και εγκατάσταση μιας φορητής μονάδας αφαλάτωσης στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix, δυναμικότητας 150 m³/ημέρα, με σκοπό να καλυφθούν οι ανάγκες ύδρευσης του ξενοδοχείου κατά την περίοδο της πλήρους λειτουργίας του. Βασική παράμετρος του σχεδιασμού ήταν να κατασκευαστεί μια μονάδα η οποία θα παράγει αφαλατωμένο πόσιμο νερό, το κόστος του οποίου να είναι συμφέρον σε σχέση με το ύψος της επένδυσης, καθώς όμως και το να καταστήσει το ξενοδοχείο μια ανεξάρτητη εγκατάσταση σε σχέση με την εταιρεία προμήθειας νερού της περιοχής. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι στις μέρες μας πολύ σημαντικό, μιας και λόγω του αυξανόμενου τουρισμού στις περισσότερες παραθεριστικές περιοχές παρατηρείται έντονο πρόβλημα κάλυψης των αναγκών νερού στις περιόδους πλήρους τουριστικής δραστηριότητας. Επίσης λόγω του πολύ προσεκτικού σχεδιασμού της μονάδας και της πρότυπης κατασκευής της, την καθιστά μια ελκυστική λύση τόσο ως προς την επένδυση όσο και προς της φιλικότητας της προς το περιβάλλον.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων επιλέχθηκε ένα ποσοστό ανάκτησης της τάξης του 40%. Λόγω αυτού και της μικρής δυναμικότητας της μονάδας αφενός η επιβάρυνσή της θαλάσσιας περιοχής από το συμπύκνωμα είναι ικανοποιητικά μικρή και αφετέρου τα απαιτούμενα χημικά ήταν σχετικά μειωμένα.

5.2 Τεχνική Περιγραφή

5.2.1 Ενεργειακός Σχεδιασμός

Το λειτουργικό κόστος μιας μονάδας αφαλάτωσης και κατά συνέπεια το κόστος αφαλατωμένου νερού ανά κυβικό μέτρο, σχετίζονται άμεσα με την ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας. Για να υπολογιστεί λοιπόν η καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση πρέπει να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένοι λειτουργικοί και σχεδιαστικοί παράμετροι. Στο παρακάτω σχήμα (5.1) φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής της μονάδας προκειμένου να γίνει αρχικά πιο ξεκάθαρο το τι αναλύεται στην συνέχεια.



Σχήμα 5-1 Απλοποιημένο διάγραμμα ροής (P&ID) της μονάδας αφαλάτωσης με RO στο Marbella Elix.

Πηγή : Sychem SA

Αρχικά, όπως τονίστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια βασικές παράμετροι για να ελαχιστοποιηθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια ανά m^3 παραγόμενου νερού είναι η χρήση εναλλάκτη πίεσης, επιλογή κατάλληλων αντλιών και μετατροπών συχνότητας (VFD). Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στην διπλωματική εργασία, τα παραπάνω πληρούνται, πράγμα που σημαίνει ότι αναμένεται μια βέλτιστη τιμή ανά κυβικό μέτρο νερού.

Η εκτίμηση της ανηγμένης ενεργειακής κατανάλωσης – ενεργειακής απόδοσης της μονάδας αφαλάτωσης με RO, αποτελεί σχετικά πολύπλοκη διαδικασία με πολλές παραμέτρους, όπου πέραν των προγραμμάτων σχεδιασμού σχετίζονται και με την εμπειρία του μελετητή από ανάλογα παραδείγματα.

Το πρώτο βήμα είναι η μοντελοποίηση της μονάδας στο πρόγραμμα ROSA, όπου δεδομένης της ζητούμενης ογκομετρικής παροχής αφαλατωμένου νερού προκύπτει μια θεωρητική τιμή για την πίεση λειτουργίας και όλα αυτά με δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας, ποιότητας ακατέργαστου νερού, βαθμού ανάκτησης και πίεση αντίθλιψης στην έξοδο του αφαλατωμένου νερού.

Η παραπάνω διαδικασία έχει, προφανώς, σαν σκοπό την επιλογή των κατάλληλων αντλιών που θα χρησιμοποιηθούν. Ειδικά σε ότι αφορά την αντλία ανακυκλοφορίας είναι απαραίτητο να γίνει και μια μελέτη πτώσης πίεσης στο κομμάτι που αφορά τις σωληνώσεις, τον εναλλάκτη πίεσης και τις μεμβράνες της μονάδας.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση των αντλιών στα δεδομένα σημεία των καμπυλών λειτουργίας τους (ογκομετρική παροχή-πίεση), με βάση τα δεδομένα που μας παρέχουν οι κατασκευαστές. Ειδικότερα στις μονάδες αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται και σύστημα ανάκτησης ενέργειας (pressure exchanger), όπως είναι η δική μας, κρίνεται αναγκαίο να συμπεριληφθεί στο ενεργειακό ισοζύγιο και η συνεισφορά τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπου έχει μελετηθεί και εγκατασταθεί εναλλάκτης πίεσης, υπολογίζεται, για τις αντλίες υψηλής πίεσης, να λειτουργούν σε παροχή περίπου ίση με του αφαλατωμένου

νερού στην πίεση λειτουργίας, ενώ ο εναλλάκτης και μια αντλία ανακυκλοφορίας μας δίνουν την επιθυμητή παροχή σε συγκεκριμένη πίεση λειτουργίας.

Στην πράξη, κατά την λειτουργία μια μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, ειδικά οι αντλίες θετικής εκτόπησης χάνουν την απόδοση τους με το πέρασ του χρόνου, ανεξάρτητα από τις προγραμματισμένες συντηρήσεις που πρέπει να υποβάλλονται. Άρα δεδομένης αυτής της συμπεριφοράς κατά τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης μιας μονάδας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η παραπάνω παράμετρος. Αντίθετα οι φυγοκεντρικές πολυβάθμιες αντλίες (αντλίες υψηλής πίεσης) που χρησιμοποιούνται εναλλακτικά, έχουν ελάχιστες έως και μηδενικές ανάγκες συντήρησης ανάλογα με τον τύπο τους. Παρόλα αυτά και οι συγκεκριμένες αντλίες με το πέρασ του χρόνου παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση λειτουργίας.

Εν κατακλείδι για την περίπτωση του Marbella Elix, υπολογίστηκε από την κατασκευάστρια εταιρεία (Sychem A.E) ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας 3kW/m^3 .

5.2.2 Περιγραφή μονάδας αφαλάτωσης (SWRO)

Στην περίπτωση της εγκατάστασης αυτόνομης μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix, που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ακολουθήθηκε η διαδικασία τριών σταδίων η οποία έχει περιγραφεί και στα προηγούμενα κεφάλαια.

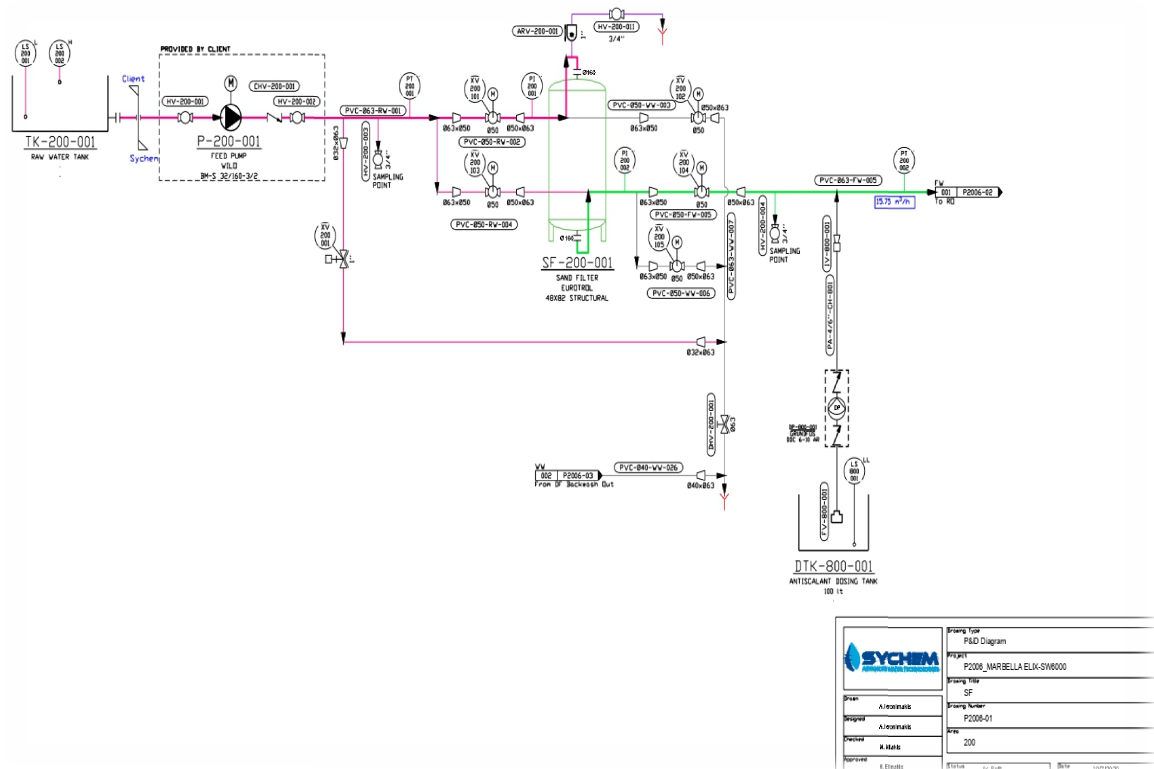
Αρχικά το ακατέργαστο θαλασσινό νερό αντλείται μέσω μιας υποβρύχιας αντλίας στην δεξαμενή ακατέργαστου νερού στην οποία είναι εγκατεστημένοι, δύο ελεγκτές στάθμης οι οποίοι ελέγχουν την στάθμη της δεξαμενής και ανάλογα δίνουν εντολή στην αντίστοιχη αντλία τροφοδοσίας είτε του ακατέργαστου νερού είτε στην αντλία τροφοδοσίας της μονάδα αφαλάτωσης.

Από το φίλτρο, το ακατέργαστο θαλασσινό νερό μεταφέρεται με σωλήνες PVC (πολυβινυλοχλωρίδιου) μέσω της αντλίας τροφοδοσίας στο στάδιο προκατεργασίας. Η διάταξη προκατεργασίας αποτελείται από ένα πλήρως εξοπλισμένο και αυτοματοποιημένο αμμόφιλτρο στο οποίο το νερό φιλτράρεται μέσα από την άμμο για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων πριν εισέλθουν στο σύστημα αντίστροφης ώσμωσης, προκειμένου να εμποδίσουν την είσοδο των επιβλαβών σωματιδίων, για τα επόμενα στάδια της διαδικασίας.

Για την πρόληψη συσσώρευσης στερεών, το φίλτρο ξεπλένεται με την διαδικασία της αντίστροφης πλύσης (backwash) είτε βάσει του χρονικού διαστήματος (δηλαδή όταν τα φίλτρα θα έχουν εκτελέσει ένα συγκεκριμένο αριθμό ωρών), ή εάν η διαφορική πίεση μεταξύ της εξόδου και της εισόδου του φίλτρου υπερβεί ένα καθορισμένο όριο.

Για την αντίστροφη πλύση και το ξέπλυμα του φίλτρου χρησιμοποιούνται οι αυτόματες βάνες και η αντλία τροφοδοσίας. Η παροχή της αντίστροφης πλύσης/ξεπλύματος ρυθμίζονται από μια κοινή διαφραγματική βάνα η οποία ρυθμίζεται ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή παροχή της αντίστροφης πλύσης που ορίζεται από τον κατασκευαστή.

Σε συγκεκριμένα σημεία (πριν και μετά το αμμόφιλτρο) υπάρχουν αναμονές για την συλλογή δείγματος του ακατέργαστου νερού. Το προς επεξεργασία νερό πριν να εισέλθει στις μεμβράνες φιλτράρεται και δοσομετρείται με αντικαθαλατωτικό μέσω διαφραγματικής δοσομετρικής αντλίας θετικής εκτόπισης για να εξασφαλιστεί η προστασία των μεμβρανών από αιωρούμενα και διαλυτά στερεά (σχήμα 5.2).



Σχήμα 5-2 Διάγραμμα ροής σταδίου προκατεργασίας

Πηγή : Sychem SA

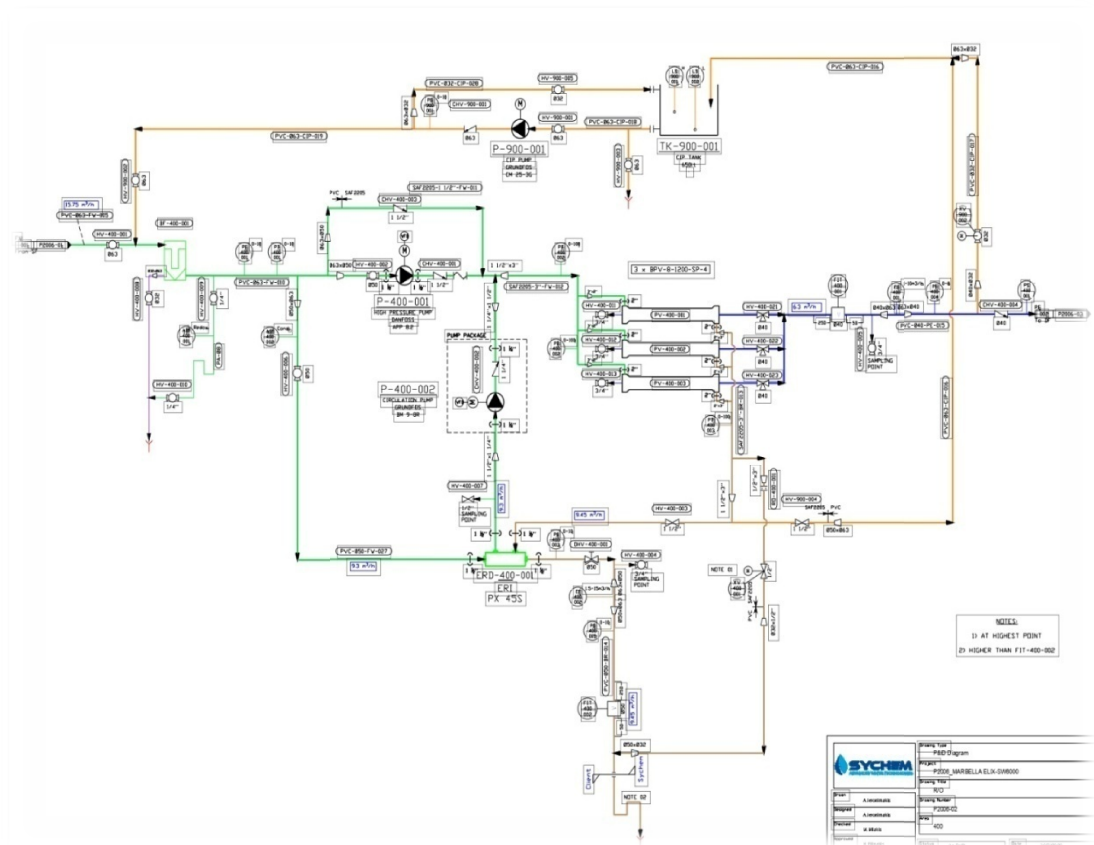
Εν συνεχεία το προς αφαλάτωση νερό πριν εισέλθει στις μεμβράνες οδηγείται σε ένα υψηλής απόδοσης φίλτρο σάκου (1μm). Τα φίλτρα σάκου μπορούν να αποτρέψουν την είσοδο σε σωματίδια μεγαλύτερα από 1 μm, τα οποία μπορεί να διέφυγαν από προηγούμενα στάδια επεξεργασίας ή να προστέθηκαν κατά τη διάρκεια της χημικής δοσομέτρησης. Ακολουθεί η κύρια διεργασία της μονάδας που είναι στην πραγματικότητα το πέρασμα του νερού από τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Η ονομαστική ροή του συστήματος αφαλάτωσης είναι 150 m³/ημερησίως. Η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης έχει σχεδιαστεί για εικοσιτετράωρη λειτουργία. Η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης αποτελείται από 12 μεμβράνες (εγκατεστημένες σε 3 δοχεία μεμβρανών), την αντλία υψηλής πίεσης, την αντλία κυκλοφορίας και το σύστημα ανάκτησης της πίεσης (ERI). Η αντλία υψηλής πίεσης σε συνδυασμό με την αντλία κυκλοφορίας και το σύστημα ανάκτησης πίεσης αυξάνουν την πίεση του θαλασσινού νερού πριν εισέλθει στα δοχεία μεμβρανών. Με το σύστημα ανάκτησης πίεσης, είναι δυνατή η ανάκτηση της υψηλής πίεσης από την ροή της άλμης και η μεταφορά αυτής της πίεσης στην ροή του ακατέργαστου νερού.

Μέσα στις μεμβράνες το νερό διαχωρίζεται σε δύο ροές: το αφαλατωμένο νερό, περνάει διαμέσου των μεμβρανών, ενώ από την άλλη πλευρά τα διαλυμένα άλατα παραμένουν στην απορριπτόμενη ροή. Το επεξεργασμένο νερό υπόκειται σε μετα-επεξεργασία και στη συνέχεια διατίθεται εκτός της μονάδας, ενώ το νερό απόρριψης διατίθεται σε διαφορετικό σημείο.

Οι βασικές παράμετροι λειτουργίας όπως η ροή παραγωγής, η ροή απόρριψης, η πίεση (είσοδος των μεμβρανών), ελέγχονται από την ρυθμιστική βάννα απόρριψης και από τις ταχύτητες περιστροφής των αντλιών υψηλής πίεσης και κυκλοφορίας. Η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας υψηλής πίεσης, καθορίζει την παροχή παραγόμενου νερού. Η ρυθμιστική βάννα απόρριψης σε συνδυασμό με την ταχύτητα περιστροφής της αντλίας κυκλοφορίας, καθορίζουν τον βαθμό ανάκτησης (recovery) της μονάδας αφαλάτωσης (σχέση μεταξύ παροχής παραγωγής και παροχής απόρριψης).

Επόμενο-ενδιάμεσο στάδιο της διεργασίας αποτελεί το σύστημα του χημικού καθαρισμού (CIP), το οποίο αποτελείται από το δοχείο χημικού καθαρισμού, την αντλία χημικού καθαρισμού και τα απαραίτητα δίκτυα, βάνες κλπ. Κατά τη διάρκεια του χημικού καθαρισμού, προστίθενται τα απαραίτητα χημικά στο δοχείο του CIP. Το χημικό διάλυμα καθαρισμού αφού διέλθει πρώτα από το φίλτρο φύσιγγας για την απομάκρυνση σωματιδίων, εισέρχεται στη συστοιχία των μεμβρανών και από εκεί επιστρέφει στο δοχείο CIP. Το χημικό διάλυμα καθαρισμού επανακυκλοφορείται για τουλάχιστον μία ώρα.

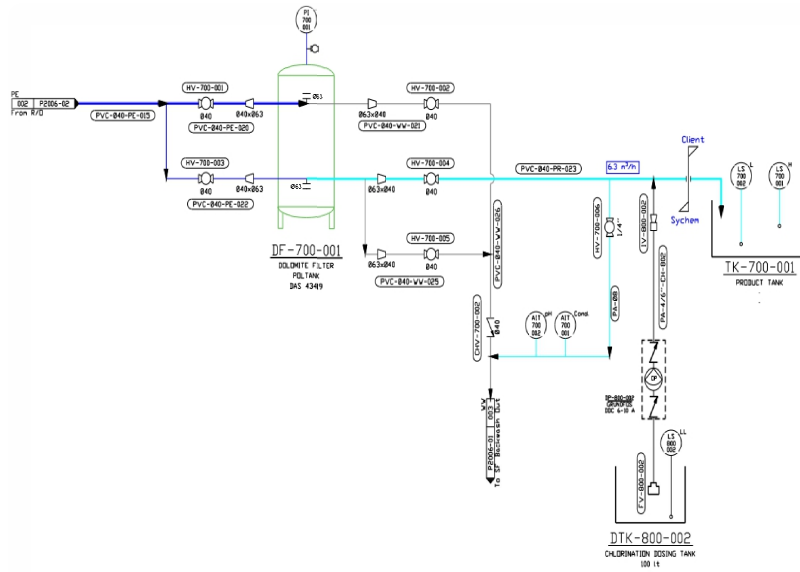
Το σύστημα χημικού καθαρισμού χρησιμοποιείται και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παύσης της μονάδας αφαλάτωσης, για την διενέργεια του αυτόματου ξεπλύματος των μεμβρανών. Η συστοιχία μεμβρανών καθώς και η αντλία υψηλής πίεσης, ξεπλένονται με αφαλατωμένο νερό χαμηλής αγωγιμότητας, προκειμένου να απομακρυνθεί το νερό υψηλής αγωγιμότητας και να αποτραπεί η δημιουργία επικαθίσεων αλάτων στις μεμβράνες.



Σχήμα 5-3 Διάγραμμα Ροής κυρίου στάδιου της διεργασίας

Πηγή : Sychem SA

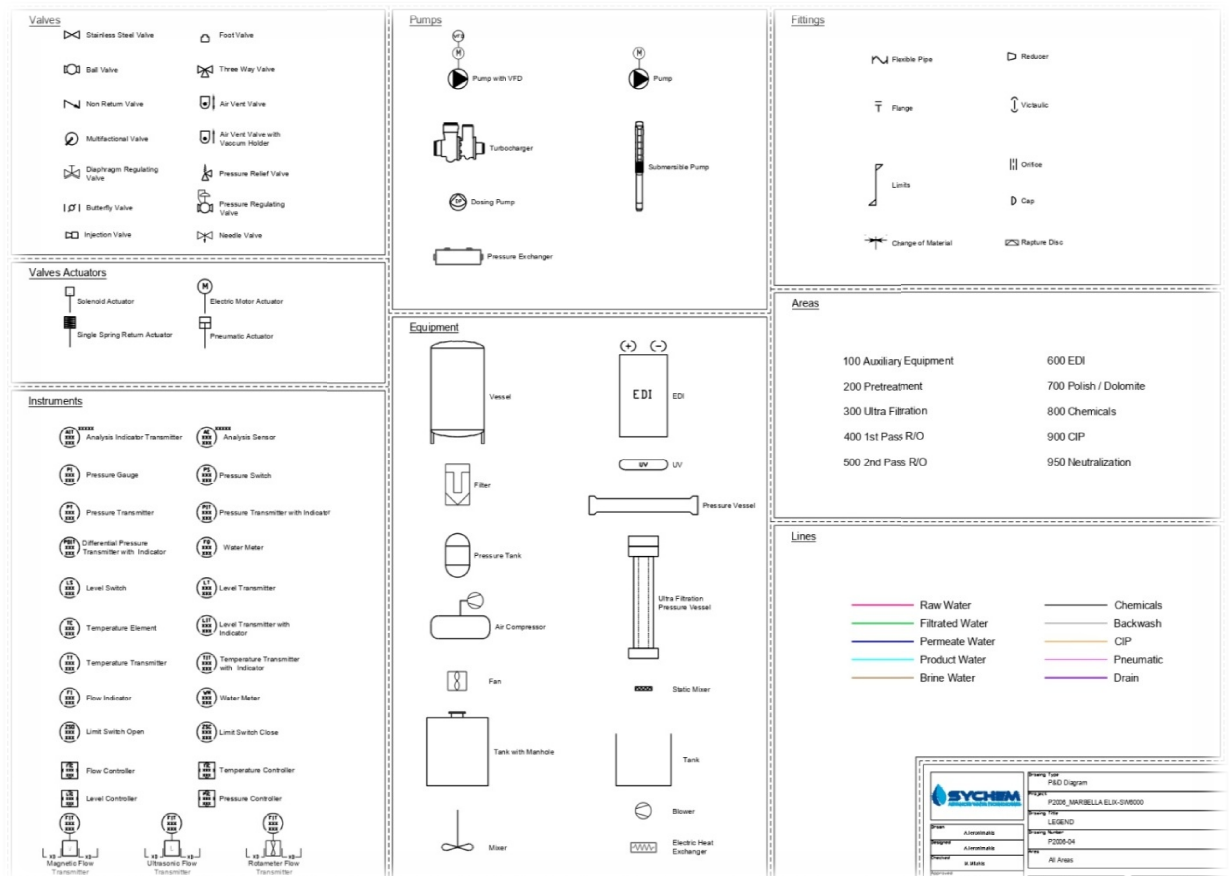
Τελευταίο στάδιο είναι αυτό της μετα-επεξεργασίας, όπου το παραγόμενο νερό από το σύστημα αντίστροφης ώσμωσης διέρχεται από το φίλτρο Δολομίτη και χλωριώνεται πριν οδηγηθεί στην Δεξαμενή Πόσιμου Νερού. Το φίλτρο δολομίτη χρησιμοποιείται για την αύξηση της τιμής του pH του επεξεργασμένου νερού από το σύστημα αντίστροφης ώσμωσης και τον εμπλουτισμό του νερού με μέταλλα απαραίτητα για την ανθρώπινη υγεία. Καθώς το νερό διέρχεται μέσα από το φίλτρο, με κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω, το ορυκτό του δολομίτη διαλύεται και επαναφέρει τη φυσική σκληρότητα του νερού, αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε φυσικά άλατα όπως άνθρακα, μαγνήσιο και ανθρακικά. Τέλος προστίθεται υποχλωριώδες νάτριο στο νερό, για την εξάλειψη τυχόν βακτηριδίων. Το τελικό νερό παραμένει μια υπολειμματική δόση απολυμαντικού, με σκοπό το νερό να διατηρηθεί στα επίπεδα του πόσιμου. Στην συνέχεια παρατίθεται και ένα υπόμνημα με τον συμβολισμό του βασικού εξοπλισμού και των εξαρτημάτων της εγκατάστασης (Σχήμα 5.5).



		Drawing type P&ID Diagram
		Project P2006_MARBELLA ELIX-SW6000
Drawn A. Sotiriadis	Checked A. Sotiriadis	Drawing Number P2006-03
		Scale 700
Approved N. Efstathiou	Design A. Sotiriadis	Date 30/07/2020

Σχήμα 5-4 Διάγραμμα Ροής σταδίου μετα-επεξεργασίας

Πηγή : Sychem SA



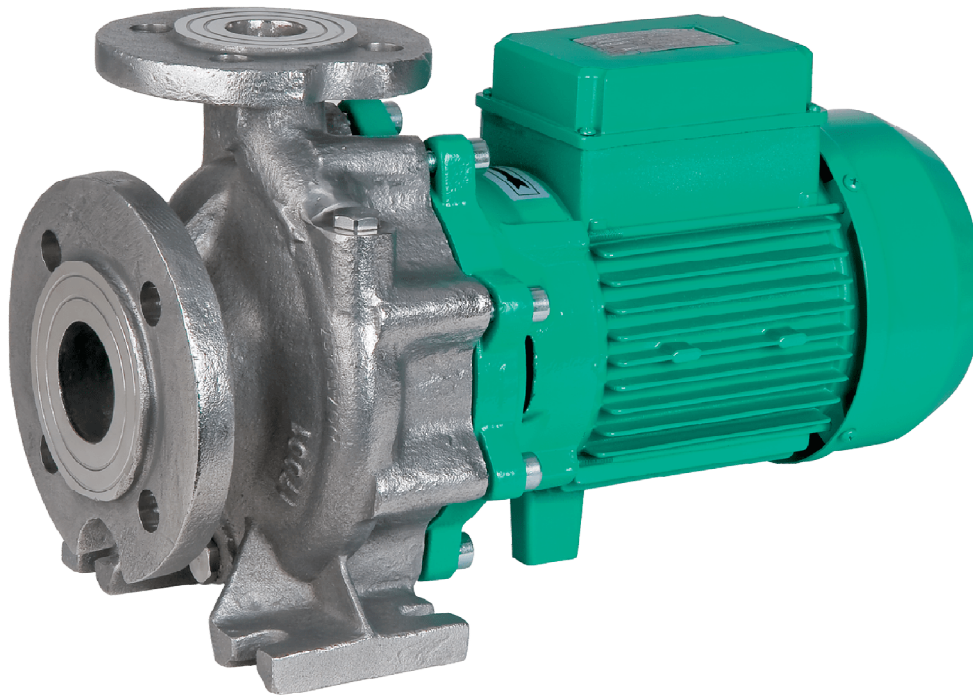
Σχήμα 5-5 Υπόμνημα συμβολισμού βασικού εξοπλισμού και εξαρτημάτων

Πηγή : Sychem SA

5.2.2.1 Εγκατεστημένος Εξοπλισμός

Κατά τον σχεδιασμό της μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση που εγκαταστάθηκε στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix, έγινε προσεκτική επιλογή του βασικού εξοπλισμού που εγκαταστάθηκε, βάση των επιθυμητών συνθηκών λειτουργίας της μονάδας και της εμπειρίας του μελετητή. Πιο συγκεκριμένα παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά τα στοιχεία του επιμέρους βασικού εξοπλισμού της μονάδας.

1. Για την τροφοδοσία του ακατέργαστου νερού στο στάδιο της προκατεργασίας εγκαταστάθηκε η αντλία WILO BM-S 32 160-3-2. Πρόκειται για μονοβάθμια τριφασική φυγοκεντρική αντλία της οποίας το κέλυφος, η πτερωτή και ο άξονας είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα 316. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας της είναι στα 10 bar, το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας είναι από -10°C έως 90°C, ενώ μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μέχρι και 40°C. Η ονομαστική ισχύς λειτουργίας της (P₂) είναι 3kW. Στις εικόνες 5.1, 5.2 και 5.3 παραθέτονται μια οπτική απεικόνιση της αντλίας, τα τεχνικά της στοιχεία και οι καμπύλες λειτουργίας της όπως διατίθενται από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 5-1 Σχηματική απεικόνιση αντλίας τροφοδοσίας

Πηγή : <https://wilo.com/gr>

BM-S 32/160-3/2

wilo

Τεχνική περιγραφή

Μονοβάθμια, ελασιόλιπαντη φυγοκεντρική αντλία σε συμπαγή κατασκευή μπλοκ με άμεσα συνδεόμενο με φλάντζα τριφασικό κινητήρα και ενιαίο άξονα. Με τοιμύχα ελατηρίου αναγκαστικής υπερχειλίσης.

ανεξάρτητη από τη φορά περιστροφής και πτερωτή μείωσης των ατμοφυσαλίδων. Η αντλία ενδείκνυται για τοποθέτηση σε βάση.

Στοιχεία λειτουργίας

Υγρό	Water
Θερμοκρασία υγρού T	-10 °C
Θερμοκρασία περιβάλλοντος T	0 °C
Μέγιστη πίεση λειτουργίας P_N	10 bar
Δείκτης ελάχιστης απόδοσης (MEI)	0,4

Υλικά

Κέλυφος αντλίας	Stainless steel
Πτερωτή	Stainless steel
Άξονας	Stainless steel
Στεγανοποίηση άξονα	Q1Q1VGG

Στοιχεία κινητήρα

Ηλεκτρική σύνδεση	3-400 V, 50 Hz
Ανοχή τάσης	±10 %
Ονομαστική ισχύς P_2	3000 W
Ονομαστική ταχύτητα n	2900 σ.α.λ.
Ονομαστικό ρεύμα I_N	6 A
Συντελεστής ισχύος $\cos \varphi$	0.83
Βαθμός απόδοσης κινητήρα η _η 50 % η _η 50%	86,4 Ποσοστό
Βαθμός απόδοσης κινητήρα η _η 75 % η _η 75%	87,3 Ποσοστό
Βαθμός απόδοσης κινητήρα η _η 100 % η _η 100%	87,1 Ποσοστό
Κατηγορία μόνωσης	F
Βαθμός προστασίας	IP55

Διαστάσεις εγκατάστασης

Σύνδεση σωλήνα στην πλευρά αναρρόφησης	DN 50
Σύνδεση σωλήνα στην κατάβληση	DN 32

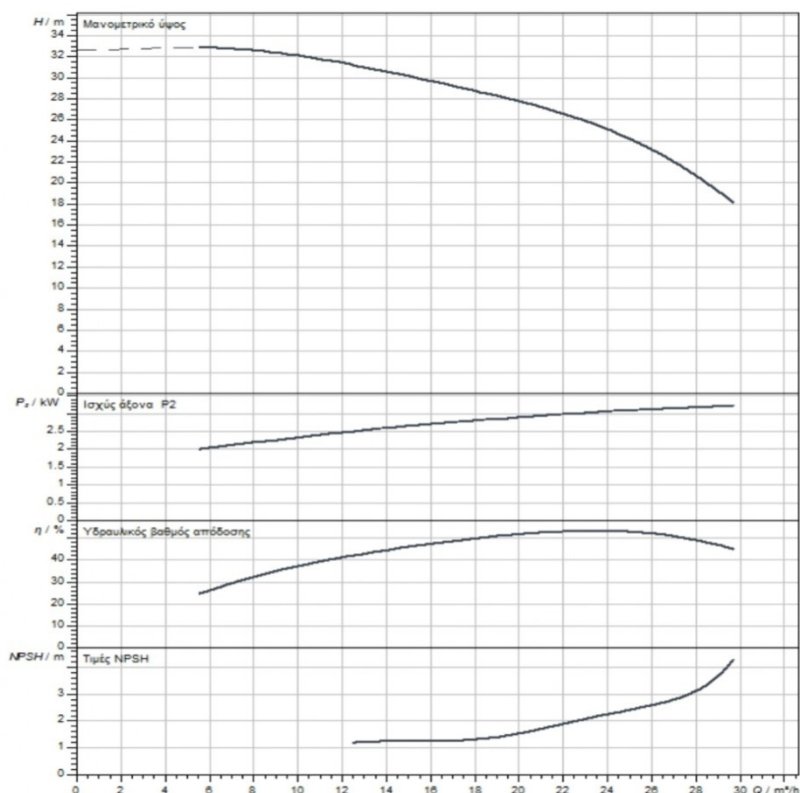
Πληροφορίες για τοποθετήσεις παραγγελίας

Κατασκευαστής	Wilo
Ονομασία προϊόντος	BM-S 32/160-3/2
Καθαρό βάρος περ. m	40 kg
Κωδικός τεμαχίου	2164433

Εικόνα 5-2 Τεχνικά στοιχεία αντλίας τροφοδοσίας

Πηγή : <https://wilo.com/gr>

Χαρακτηριστικά διαγράμματα



Εικόνα 5-3 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας αντλίας τροφοδοσίας

Πηγή : <https://wilo.com/gr>

2. Για την φίλτραση του νερού στο στάδιο της προκατεργασίας τοποθετήθηκε πολυεστερικό φίλτρο, πλήρως αυτοματοποιημένο και εξοπλισμένο με πέντε αυτόματες βάνες PVC-U. Η πλήρωσή του γίνεται με χαλαζιακή άμμο τριών διαφορετικών κοκκομετριών. Το ακατέργαστο νερό τροφοδοτείται στην κορυφή του φίλτρου και εξέρχεται απαλλαγμένο από αιωρούμενα σωματίδια και μικροοργανισμούς. Η ταχύτητα διήθησης καθορίζεται από τον κατασκευαστή το ίδιο και η ταχύτητα διήθησης για την λειτουργία της αντίστροφης πλύσης (backwash).



Εικόνα 5-4 Φίλτρο άμμου από την μονάδα αφαλάτωσης στο Marbella Elix

Πηγή : Sychem SA

3. Η δοσομέτρηση αντικαθαλωτικού στο νερό τροφοδοσίας γίνεται μέσω διαφραγματικής δοσομετρικής αντλίας θετικής εκτόπισης, από δοχείο δοσομέτρησης 100lt με διακόπτη στάθμης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η αντλία Grundfos DDC 6-10 AR, η οποία διαθέτει βηματικό κινητήρα, κεφαλή δοσομέτρησης από πολυπροπυλένιο (PP), διπλές σφαιρικές βαλβίδες για μεγαλύτερη ακρίβεια δοσομέτρησης καθώς και βαλβίδα απαέρωσης. Στις εικόνες 5.4,5.5 και 5.6 παρατίθεται μια σχηματική απεικόνιση της αντλίας, οι τεχνικές της προδιαγραφές και η καμπύλη λειτουργίας της.



Εικόνα 5-5 Απεικόνιση δοσομετρικής αντλίας αντικαθαλωτικού

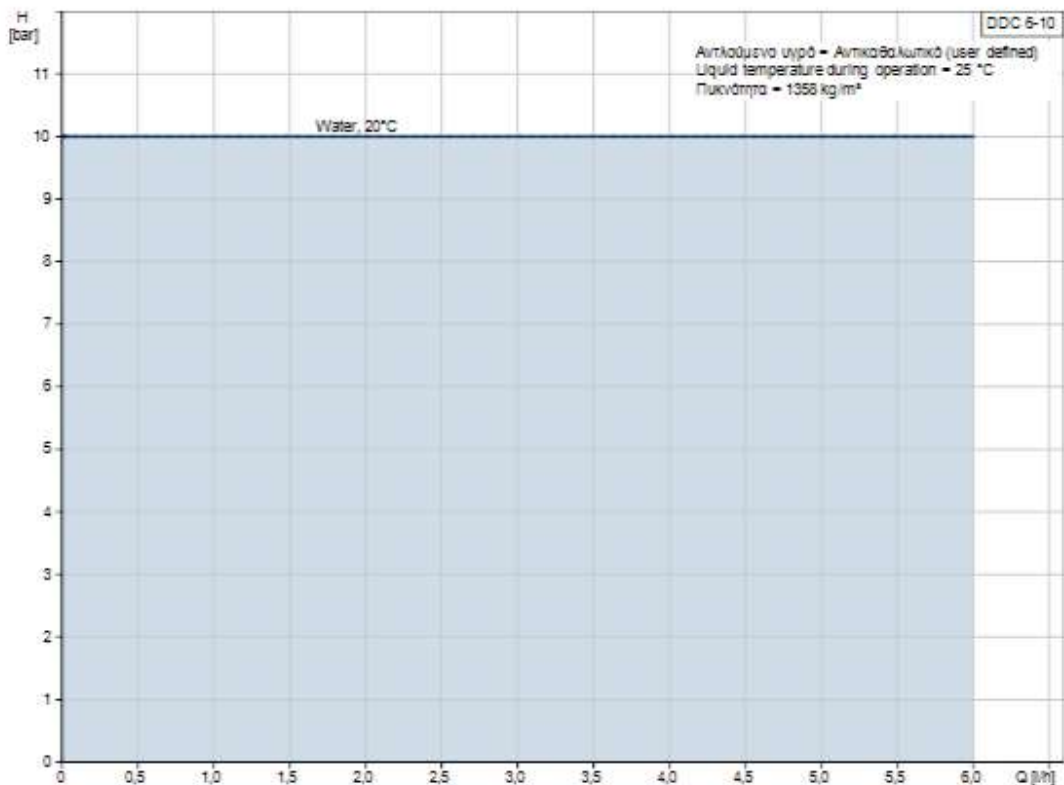
Πηγή : <https://www.grundfos.com/gr>

Προδιαγραφές

Όνομα προϊόντος	DDC 6-10	Υγρό	
Αρ. Προϊόντος	97721529	Αντλούμενο υγρό	Any Newtonian liquid
Αριθμός EAN	5710622716719	Περιοχή θερμοκρασίας υγρού	-10 ... 45 °C
Τιμή		Επιλεγμένη θερμοκρασία υγρού	25 °C
Τεχνικός		Πυκνότητα	1358 kg/m ³
Επεξήγηση τύπου	DDC 6-10 A-PP/E/C-F-3IU/U7BG	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	
Μέγ. παροχή	6 l/h	Μακίμια power input - P1	22 W
Μέγ. παροχή σε λειτουργία slow mode 50%	3 l/h	Συχνότητα δικτύου	50 / 60 Hz
Μέγ. παροχή σε λειτουργία slow mode 25%	1.5 l/h	Όνομαστική τάση	1 x 100-240 V
Ελάχ. παροχή	6.0 ml/h	Βαθμός προστασίας (IEC 34-5)	IP65 / NEMA 4X
Λόγος μέγ./ελάχ. ροής	1:1000	Μήκος καλωδίου	1.5 m
Εγκρίσεις στην πινακίδα	CE,CSA-US,RCM	Τύπος καλωδίου με βόσισμα	USA, Canada
Τύπος βαλβίδας	Στάνταρ	Μεταβατικό ρεύμα εκκίνησης	25A στα 230V για 2ms
Μέγιστο εξώδες σε 100 %	50 mPas	Χειριστήρια	
Μέγιστο εξώδες σε αργή απόκριση 50 %	1800 mPas	Τύπος ελέγχου	A
Μέγιστο εξώδες σε αργή απόκριση 25%	2500 mPas	Πίνακας ελέγχου	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΟ ΜΠΡΟΣΤΙΝΟ ΜΕΡΟΣ
Ακρίβεια επαναληψιμότητας	1 %	Έλεγχος στάθμης	YES
Υλικά		Έλεγχος παλμών	NAI
Κεφαλή δοσομέτρησης	PP (Πολυπροπυλένιο)	Εξ. είσοδος παύσης	NAI
Σφαιρική βαλβίδα	Κεραμικό	Άλλα	
Τσιμούχα	EPDM	Καθαρό βάρος	2 kg
		Μεικτό βάρος	3 kg

Εικόνα 5-6 Τεχνικές Προδιαγραφές αντλίας δοσομέτρησης αντικαθαλωτικού

Πηγή : <https://www.grundfos.com/gr>



Εικόνα 5-7 Καμπύλη λειτουργίας αντλίας δοσομέτρησης αντικαθαλωτικού

Πηγή : <https://www.grundfos.com/gr>

4. Στο τελευταίο στάδιο της προκατεργασίας χρησιμοποιήθηκε σακόφιλτρο της εταιρείας Eaton (εικόνα 5.7) με απόλυτο μέγεθος ορίου φιλτραρίσματος 1μm κατασκευασμένο από ενισχυμένο πολυπροπυλένιο (PP),PN 10 bar (μέγιστη πίεση λειτουργίας). Το σακόφιλτρο τοποθετείται σε ειδικό δοχείο εισαγωγής (κάθετο πολυπροπυλενίου) διότι έτσι διευκολύνεται η εισαγωγή και η σωστή ευθυγράμμιση του φίλτρου. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι οι 90⁰C ενώ η μέγιστη επιτρεπτή διαφορική πίεση μεταξύ εισόδου και εξόδου του φίλτρου είναι 2.5 bar.



Εικόνα 5-8 Σακόφιλτρο Eaton

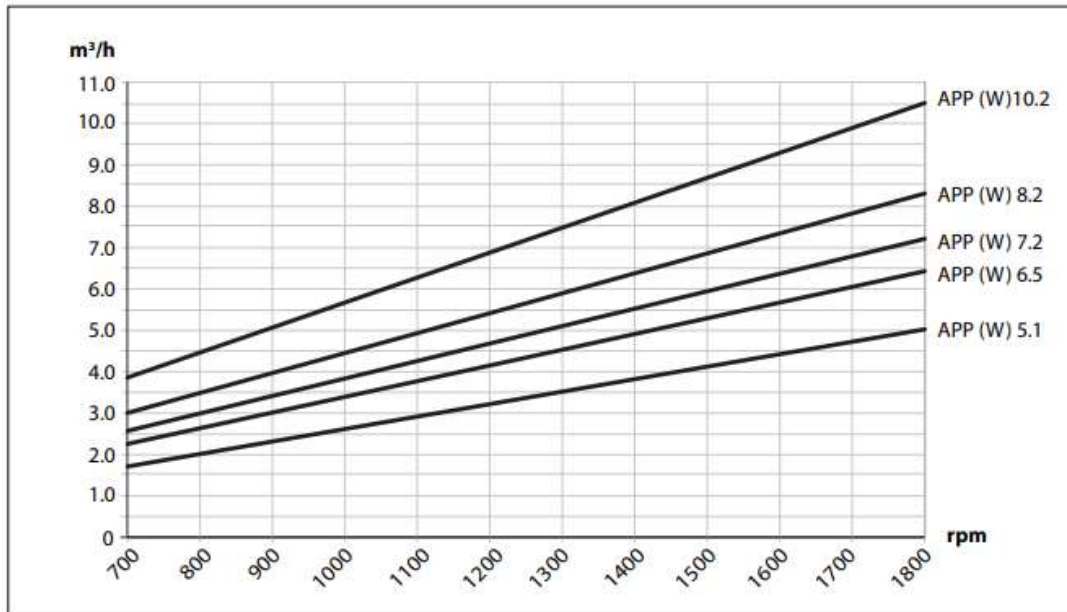
Πηγή : Sychem SA

5. Η αντλία υψηλής πίεσης που εγκαταστάθηκε στην μονάδα αφαλάτωσης στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix είναι η Danfoss APP 8.2 (εικόνα 5.9). Πρόκειται για εμβολοφόρο αντλία θετικής εκτόπισης, κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα Super Duplex, εξοπλισμένη με κινητήρα ισχύος 18.5 kW που οδηγείται μέσω μετατροπέα συχνότητας Danfoss VTL Aqua Drive FC280 18.5 kW. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι οι 50°C, μπορεί να λειτουργεί από ελάχιστη ογκομετρική παροχή τα 3m³/h μέχρι και τα 8.31m³/h. Οι εμβολοφόρες αντλίες θετικής εκτόπισης μπορούν να λειτουργούν σε σταθερή παροχή ανεξάρτητα με την εφαρμοζόμενη πίεση. Το εύρος λειτουργίας της όσον αφορά την πίεση είναι από 0.5 bar μέχρι και τα 5 bar για την αναρρόφηση και από 20 bar μέχρι και 80 bar όσο αναφορά την κατάθλιψη.



Εικόνα 5-9 Αντλία υψηλής πίεσης Danfoss APP 8.2

Πηγή : Sychem SA



Εικόνα 5-10 Διάγραμμα παροχής – στροφών αντλίας υψηλής πίεσης

Πηγή : <https://www.danfoss.com/en/>

6. Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας που εγκαταστάθηκε (εναλλάκτης πίεσης), είναι από τον κατασκευαστικό οίκο ERI - Pressure Exchanger Px-45S. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ο συγκεκριμένος εναλλάκτης πίεσης μπορεί να εξοικονομήσει έχρι και 60% της χαμένης ενέργειας από τον αλμόλοιπο, καθώς μειώνει το μέγεθος της αντλίας υψηλής πίεσης. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι δεν καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια και χρειάζεται μηδενική συντήρηση. Στην εικόνα 5.11 φαίνεται ο εναλλάκτης πίεσης εγκατεστημένος στην μονάδα, ενώ στην εικόνα 5.12 ο πίνακας λειτουργίας και απόδοσης του συστήματος ανάκτησης ενέργειας. Η συγκεκριμένη μονάδα αφαλάτωσης έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί σε συνθήκες, για τον αλμόλοιπο, παροχής 9.45m³/h στα 60 bar πίεση εισόδου στον εναλλάκτη πίεσης και για το ακατέργαστο νερό σε παροχή 9.3m³/h στα 57.6 bar περίπου πίεσης εξόδου από τον εναλλάκτη πίεσης.



Εικόνα 5-11 Φωτογραφική απεικόνιση εναλλάκτη πίεσης

Πηγή : Sychem SA

PX Pressure Exchanger Performance Chart Figures are calculated using a "mid-flow" range.		
PX Model	Peak Efficiency*	Flow Range per Unit (brine flow)
PX Q300	98.00%	45.4-68.1 m ³ /h
PX Q260	98.00%	40.9-59.1 m ³ /h
PX 260	98.00%	40.9-59.1 m ³ /h
PX Q220	97.00%	31.8-50.0 m ³ /h
PX 220	98.00%	31.8-50.0 m ³ /h
PX Q180	97.00%	22.7-40.9 m ³ /h
PX 180	98.00%	22.7-40.9 m ³ /h
PX Q140	98.00%	20.4-31.8 m ³ /h
PX 140	96.00%	20.4-31.8 m ³ /h
PX 90	97.00%	13.6-20.4 m ³ /h
PX 70	96.00%	9.1-15.9 m ³ /h
PX 45	96.00%	6.8-10.2 m ³ /h
PX 30	96.00%	4.5-6.8 m ³ /h

*These peak efficiencies are based on Energy Recovery's factory performance test standards. Models include Q300, Q260, 260 and 220

Εικόνα 5-12 Πίνακας λειτουργίας και απόδοσης εναλλάκτη πίεσης

Πηγή : <https://energyrecovery.com>

7. Για να εξισορροπιστεί η πίεση εισόδου στις μεμβράνες με αυτήν της αντλίας υψηλής πίεσης, μετά το σύστημα ανάκτησης ενέργειας έχει εγκατασταθεί η αντλία ανακυκλοφορίας Grundfos BM 9-8R. Πρόκειται για πολυβάθμια φυγοκεντρική αντλία κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα Super Duplex, εξοπλισμένη με κινητήρα ισχύος 1.5 kW, που οδηγείται μέσω μετατροπέα συχνότητας Danfoss VLT Aqua Drive FC202 1.5 kW. Ο ρόλος της συγκεκριμένης αντλίας είναι να αποσβάνει τις απώλειες των τριβών στον εναλλάκτη πίεσης και στο κομμάτι του δικτύου των σωληνώσεων του ακατέργαστου νερού, που παρεμβάλλεται από τον κεντρικό κλάδο του κυκλώματος και περνά από το σύστημα ανάκτησης ενέργειας. Στις εικόνες 5.13, 5.14 και 5.15 φαίνεται η αντλία ανακυκλοφορίας εγκατεστημένη στην μονάδα, τα τεχνικά της χαρακτηριστικά και η καμπύλη λειτουργίας της αντίστοιχα.



Εικόνα 5-13 Αντλία ανακυκλοφορίας

Πηγή : Sychem SA

SP submersible pump with motor built into a stainless steel sleeve in a totally sealed construction.

Modules of different sizes can be combined and connected either in series or in parallel to meet exact Q/H requirements.

Liquid:

Pumped liquid: Water
Maximum liquid temperature: 104 °F
Selected liquid temperature: 68 °F
Density: 62.29 lb/ft³

Technical:

Rated flow: 47.1 US gpm
Rated head: 192.9 ft
Curve tolerance: ISO9906:2012 3B

Materials:

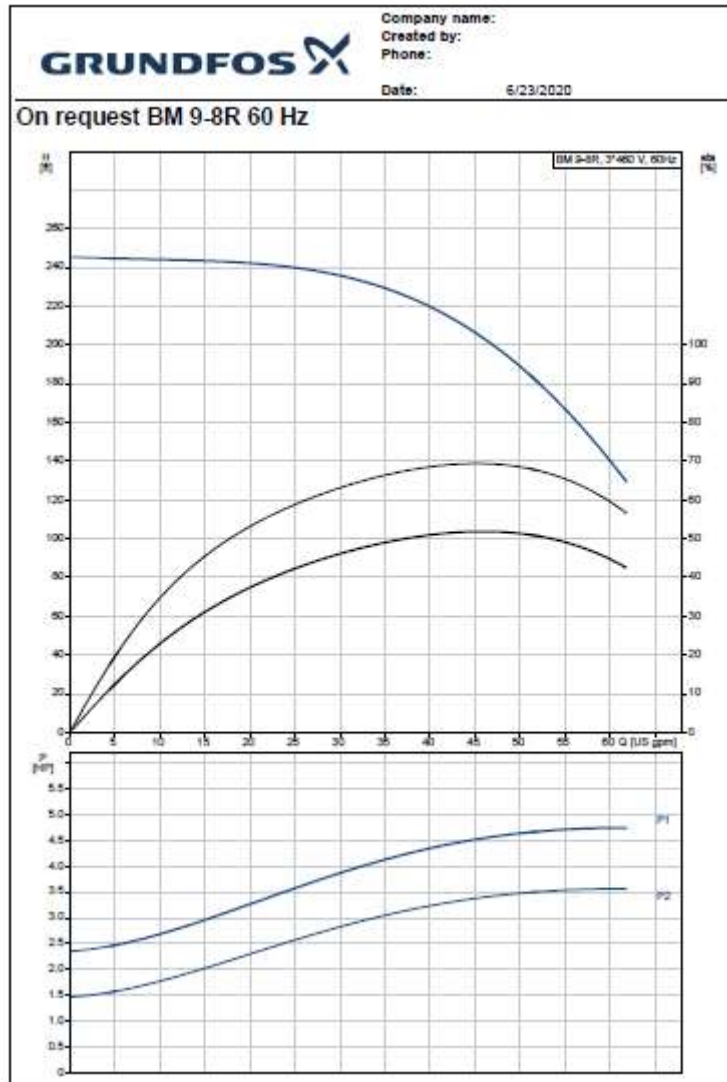
Pump: Stainless steel
DIN W.-Nr. 1.4539
AISI 904 L
Impeller: Stainless steel
DIN W.-Nr. 1.4539
AISI 904 L
Motor: Stainless steel
DIN W.-Nr. 1.4539
AISI 904 L
Sleeve: Stainless steel
DIN W.-Nr. 1.4462
AISI SAF 2205
Rubber: NBR

Installation:

Maximum permissible inlet pressure: 870.23 psi
Maximum permissible outlet pressure: 1189.31 psi
Flange standard: PJE
Pipe connection: 42 mm

Εικόνα 5-14 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας ανακυκλοφορίας

Πηγή : <https://www.grundfos.com/gr>



Εικόνα 5-15 Καμπύλες λειτουργίας αντλίας ανακυκλοφορίας

Πηγή : <https://www.grundfos.com/gr>

8. Οι μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης τοποθετήθηκαν σε τρία δοχεία πίεσης (4 μεμβράνες ανά δοχείο) Arisawa BPV-8-1200-SP-4, τα οποία είναι κατασκευασμένα από FRP (μείξη ινών υάλου με πολυεστερικές ρητίνες) με μέγιστη πίεση λειτουργίας τα 1200 psi. Η διατομή των δοχείων πίεσης είναι 8 ίντσες, οι αναμονές τροφοδοσίας του ακατέργαστου νερού και η απόρριψη του αλμόλιπου γίνονται πλευρικά του δοχείου, ενώ η έξοδος του αφαλατωμένου νερού γίνεται από το άκρο του.



Εικόνα 5-16 Δοχεία πίεσης – Έξοδος αφαλατωμένου νερού

Πηγή : Sychem SA

9. Σε κάθε δοχείο πίεσης τοποθετήθηκαν τέσσερις μεμβράνες σπειροειδούς διαμόρφωσης της εταιρείας, Dupont- SW30-XHRLE-440 Dow Filmtec. Οι συγκεκριμένες μεμβράνες έχουν ενεργή επιφάνεια φίλτρανσης 41 m^2 , γεγονός το οποίο επιτρέπει την μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας, ενώ ταυτόχρονα καθιστά τον σχεδιασμό ακριβή και προβλέψιμο όσον αφορά την παραγωγή αφαλατωμένου νερού. Ένα επιπλέον συγκριτικό πλεονέκτημα των μεμβρανών αυτών είναι το γεγονός ότι διαθέτουν πολύ παχύ οριακό στρώμα μεταξύ του διαλύματος τροφοδοσίας και των στοιχείων της μεμβράνης ($28 \text{mils} = 0.72 \text{mm}$), στοιχείο το οποίο σε συνδυασμό με την μεγάλη επιφάνεια φίλτρανσης, μειώνει τις ανάγκες καθαρισμού των μεμβρανών και καθιστά τις πλύσεις τους ιδιαίτερα αποδοτικές. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 5.17 και 5.18 οι εγκατεστημένες μεμβράνες στην μονάδα αφαλάτωσης του Marbella Elix, μπορούν να παράξουν μέχρι και $30.2 \text{m}^3/\text{d}/\text{μεμβράνη}$ και να απορρίψουν το 92% του βορίου και το

99.8% του άλατος από το διάλυμα τροφοδοσίας (δεδομένες συνθήκες για την σύσταση του διαλύματος τροφοδοσίας, την θερμοκρασία, το pH και την ανάκτηση).

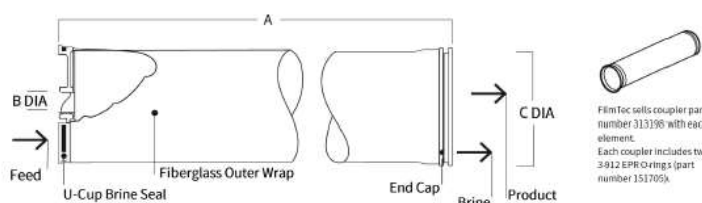
FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flowrate		Stabilized Boron Rejection (%)	Stabilized Salt Rejection (%)
	(ft ²)	(m ²)		(gpd)	(m ³ /d)		
SW30HRLE-440	440	41	28	8,000	30.2	92	99.80

1. The above values are normalized to the following conditions: 32,000 ppm NaCl, 5 ppm boron, 800 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary ± 15%.
3. Minimum Salt Rejection is 99.65%.
4. Stabilized salt rejection is generally achieved within 24 – 48 hours of continuous use, depending upon feedwater characteristics and operating conditions.
5. Product specifications may vary slightly as improvements are implemented.
6. Active area guaranteed ± 5%. Active area as stated by DuPont Water Solutions is not comparable to the nominal membrane area figure often stated by some element suppliers.

Εικόνα 5-17 Τεχνικά χαρακτηριστικά μεμβρανών

Πηγή : <https://www.dupont.com/brands/filmtec.html>

Element Dimensions



FilmTec™ Element	Dimensions – inches (mm)				1 inch = 25.4 mm	
	A		B		C	
	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)
SW30HRLE-440	40.0	1,016	1.125 ID	29 ID	7.9	201

1. Refer to [FilmTec™ Design Guidelines for multiple-element systems of 8-inch elements](#) (Form No. 45-D01695-en).
2. Element to fit nominal 8-inch (203-mm) I.D. pressure vessel.

Operating and Cleaning Limits

Maximum Operating Temperature ^{a,b}	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure ^b	1,200 psig (83 bar)
Maximum Element Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
pH Range	
Continuous Operation ^a	2 – 11
Short-term Cleaning (30 min) ^c	1 – 13
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance ^d	< 0.1 ppm

Εικόνα 5-18 Διαστάσεις και όρια λειτουργίας των μεμβρανών

Πηγή : <https://www.dupont.com/brands/filmtec.html>

10. Για την αύξηση της σκληρότητας του αφαλατωμένου νερού μετά την έξοδό του από τις μεμβράνες της μονάδας τοποθετήθηκε το φίλτρο δολομίτη Poltank DAS 43419 (εικόνα 5.19), το οποίο είναι κατασκευασμένο από FRP, έχει διάμετρο 800 mm και ύψος κλίνης 1 m. Η επιφάνεια φιλτραρίσματος είναι 0.48 m² και η προτεινόμενη ταχύτητα διήθησης από τον κατασκευαστή είναι 30 m²/h/m². Σύμφωνα με τον κατασκευαστή συνιστάται η πλήρωσή του με 530 kg άμμου και 165 kg χαλκιού. Στο φίλτρο είναι εγκατεστημένη κατάλληλη διάταξη πέντε χειροκίνητων βανών έτσι ώστε να γίνεται η αντίστροφη πλύση του.



Εικόνα 5-19 Φίλτρο δολομίτη – Poltank Das 43419

Πηγή : Sychem SA

11. Στο τελευταίο στάδιο της μετα-κατεργασίας το αφαλατωμένο νερό χλωριώνεται έτσι ώστε να είναι κατάλληλο για χρήση από το ξενοδοχείο. Η διαδικασία της χλωρίωσης γίνεται μέσω της διαφραγματικής δοσομετρικής αντλίας θετικής εκτόπισης Grundfos DDC 6-10 A, η οποία αντλεί το χλώριο από δοχείο δοσομέτρησης 100 λίτρων, το οποίο διαθέτει και διακόπτη στάθμης. Στις εικόνες 5.20 και 5.21 φαίνεται η δοσομετρική αντλία τοποθετημένη στην μονάδα και τα τεχνικά της χαρακτηριστικά αντίστοιχα.



Εικόνα 5-20 Δοσομετρικές αντλίες αντικαθαλωτικού νερού και χλωρίου στην μονάδα αφαλάτωσης

Πηγή : Sychem SA

Όνομα προϊόντος	DDC 6-10 A-PVC/V/C-F-3IU2U2FG	Υγρό	
Αρ. Προϊόντος	99039289	Περιοχή θερμοκρασίας υγρού	-10 .. 45 °C
Αριθμός EAN	5712605591474	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	
Τιμή		Μaximum power Input - P1	22 W
Τεχνικός		Συχνότητα δικτύου	50 Hz
Επεξήγηση τύπου	DDC 6-10 A-PVC/V/C-F-3IU2U2FB	Ονομαστική τάση	1 x 100-240 V
Μέγ. παροχή	6 l/h	Βαθμός προστασίας (IEC 34-5)	IP65 / NEMA 4X
Μέγ. παροχή σε λειτουργία slow mode 50%	3 l/h	Μήκος καλωδίου	1.5 m
Μέγ. παροχή σε λειτουργία slow mode 25%	1.5 l/h	Τύπος καλωδίου με βύσμα	EU
Ελάχ. παροχή	6.0 ml/h	Μεταβατικό ρεύμα εκκίνησης	25A στα 230V για 2ms
Λόγος μέγ./ελάχ. ροής	1:1000	Χειριστήρια	
Εγκρίσεις στην πινακίδα	CE, CSA-US, NSF61, EAC, RCM	Τύπος ελέγχου	A
Τύπος βαλβίδας	Στάνταρ	Πίνακας ελέγχου	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΟ ΜΠΡΟΣΤΙΝΟ ΜΕΡΟΣ
Μέγιστο ιξώδες σε 100 %	50 mPas	Έλεγχος στάθμης	YES
Μέγιστο ιξώδες σε αργή απόκριση 50 %	1800 mPas	Έλεγχος παλμών	NAI
Μέγιστο ιξώδες σε αργή απόκριση 25%	2500 mPas	Εξ. είσοδος παύσης	NAI
Ακρίβεια επαναληψιμότητας	1 %	Άλλα	
Υλικά		Καθαρό βάρος	2 kg
Κεφαλή δοσομέτρησης	PVC (Πολυβινυλοχλωρίδιο)	Μεικτό βάρος	3 kg
Σφαιρική βαλβίδα	Κεραμικό	Χρώμα	KOKKINO
Τσιμούχα	FKM		

Εικόνα 5-21 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας χλωρίωσης

Πηγή : <https://www.grundfos.com/gr>

12. Για τον χημικό καθαρισμό της μονάδας χρησιμοποιήθηκε η αντλία Grundfos CM 25-3G. Πρόκειται για οριζόντια, πολυβάθμια φυγοκεντρική αντλία κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ατσάλι AISI 316 με κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE3, 5.5 kW, η οποία αντλεί το χημικό καθαρισμού από δεξαμενή 500 λίτρων κατασκευασμένη από MDPE (πολυαιθυλένιο μέσης πυκνότητας) με ενσωματωμένη αντίσταση. Στις εικόνες 5.22, 5.23 και 5.24 φαίνεται η αντλία του χημικού καθαρισμού εγκατεστημένη οι τεχνικές της προδιαγραφές και οι καμπύλες λειτουργίας της αντίστοιχα.



Εικόνα 5-22 Αντλία χημικού καθαρισμού - CM 25-3G

Πηγή : Sychem SA

Technical data

Controls:
Frequency converter: NONE

Liquid:
Pumped liquid: Water
Liquid temperature range: -20 ... 120 °C
Selected liquid temperature: 20 °C
Density: 998.2 kg/m³

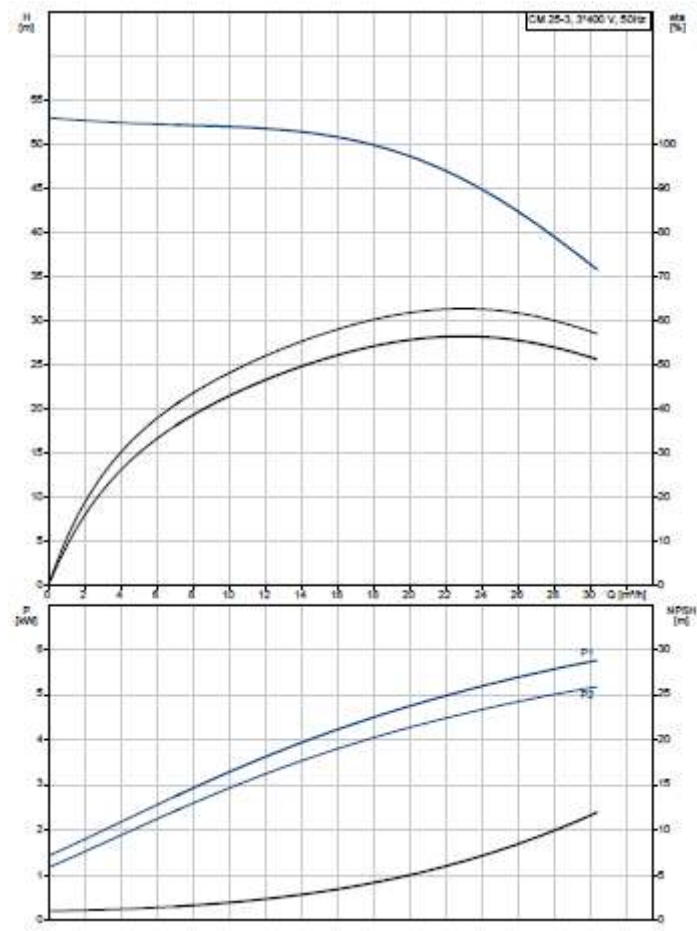
Technical:
Pump speed on which pump data are based: 2900 rpm
Rated flow: 22 m³/h
Rated head: 46.12 m
Code for shaft seal: AQQE
Approvals: CE,WRAS,ACS,TR,EAC
Curve tolerance: ISO9906:2012 3B

Materials:
Pump housing: Stainless steel
EN 1.4401
AISI 316
Impeller: Stainless steel
EN 1.4401
AISI 316

Installation:
Range of ambient temperature: -20 ... 55 °C
Maximum operating pressure: 16 bar
Max pressure at stated temp: 16 bar / 90 °C
10 bar / 120 °C
Type of connection: Rp
Size of inlet connection: 2 inch
Size of outlet connection: 2 inch
Outlet position: 12

Electrical data:
Motor standard: IEC
Frame size: 132SC
IE efficiency class: IE3
Rated power - P2: 5.5 kW
Mains frequency: 50 Hz
Suitable for 50/60 Hz: N
Phases: 3
Rated voltage: 220-240D/380-415Y V
Service factor: 1.00

Εικόνα 5-23 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας χημικού καθαρισμό



Εικόνα 5-24 Καμπύλες λειτουργίας αντλίας χημικού καθαρισμού

Πηγή : <https://www.grundfos.com/gr>

13. Τέλος τα δίκτυα υψηλής πίεσης κατασκευάστηκαν εξ' ολοκλήρου από Duplex SAF2205 και SAF2507 με κύρια διάμετρο 2", ενώ χρησιμοποιήθηκε σωλήνα από PVC για τα δίκτυα χαμηλής πίεσης. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα εποπτείας:

- Ανοξείδωτα μανόμετρα: Wika για χαμηλές πιέσεις.
- Ανοξείδωτα μανόμετρα: API για υψηλές πιέσεις.
- Μεταδότες Πίεσης: Jumo Midas C18SW.
- Παροχόμετρα paddle wheel: FIP FLS F6.30.01.
- Αναλυτικά όργανα: Πολυπαραμετρική μονάδα ελέγχου/μεταδότη με οθόνη αφής JUMO AQUIS TOUCH S, μετρητές αγωγιμότητας, μετρητές Redox, μετρητές pH.
- Ροόμετρα πλωτήρα του οίκου Praher.

5.2.3 Συμπεριφορά - Απόδοση μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης

Κατά τον σχεδιασμό της μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, πολύ σημαντική διαδικασία είναι η μελέτη της συμπεριφοράς και απόδοσης των μεμβρανών σε σχέση με την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας. Στην πραγματικότητα εμπειρικά εκτιμάται η επιλογή της μεμβράνης που θα εγκατασταθεί με πολύ μικρό ρίσκο λάθους ή αστοχίας. Παρόλα αυτά έχουν αναπτυχθεί λογισμικά υπολογισμού της απόδοσης των μεμβρανών και πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους κατά την λειτουργία της μονάδας. Για το συγκεκριμένο έργο χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ROSA 9.1.

Εισάγονται στο πρόγραμμα όλες οι βασικές παράμετροι που έχουν εκτενώς αναλυθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, επιλέγεται το μοντέλο της μεμβράνης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, η χημική ανάλυση του νερού τροφοδοσίας καθώς και οι αντλίες κυκλοφορίας που θα εγκατασταθούν. Αφού εισαχθούν όλα τα στοιχεία, δεξιά του πίνακα καταγραφής της χημικής σύστασης του νερού τροφοδοσίας το λογισμικό υπολογίζει την χημική σύσταση του αλμόλοιπου και αφαλατωμένου νερού σε ένα στάδιο περάσματος από τις μεμβράνες (εικόνα 5.25).

Project Information:

Case-specific: SW30HRLE-440

System Details:

Feed Flow to Stage 1	15.75 m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	6.30 m ³ /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	15.75 m ³ /h	Pass 1 Recovery	40.00 %	Feed	29.82 bar
Feed Pressure	60.78 bar	Feed Temperature	18.0 C	Concentrate	51.12 bar
Flow Factor	1.00	Feed TDS	42598.36 mg/l	Average	40.47 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	12	Average NDP	19.89 bar
Total Active Area	490.51 M ²	Average Pass 1 Flux	12.84 l/mh	Power	33.24 kW
Water Classification: Well Water SDI < 3				Specific Energy	5.28 kWh/m ³

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m ³ /h)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (l/mh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	SW30HRLE-440	3	4	15.75	60.43	0.00	9.45	60.04	6.30	12.84	0.00	0.00	152.37

Name	Feed	Pass Streams (mg/l as Ion)			
		Adjusted Feed	Concentrate		Permeate
			Stage 1	Stage 1	
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	415.00	415.00	690.35	1.97	1.97
Na	13240.00	13240.00	22030.57	54.09	54.09
Mg	1480.00	1480.00	2465.66	1.50	1.50
Ca	560.00	560.00	932.96	0.56	0.56
Sr	8.00	8.00	13.33	0.01	0.01
Ba	0.03	0.03	0.05	0.00	0.00
CO3	30.34	30.34	51.90	0.00	0.00
HCO3	156.00	156.00	257.27	1.01	1.01
NO3	2.10	2.10	3.44	0.09	0.09
Cl	23926.00	23981.43	39909.49	89.24	89.24
F	1.00	1.00	1.66	0.01	0.01
SO4	2700.00	2700.00	4499.32	1.02	1.02
SiO2	3.00	3.00	4.99	0.02	0.02
Boron	3.76	3.76	5.93	0.50	0.50
CO2	0.50	0.50	1.01	0.50	0.50
TDS	42552.93	42598.36	70894.84	152.37	152.37
pH	8.25	8.25	8.25	6.51	6.51

*Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

Εικόνα 5-25 ROSA 9.1 Υπολογιστικό φύλλο 1**Πηγή : Sychem SA**

Ακόμα στο πρώτο υπολογιστικό φύλλο του λογισμικού υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας και το κόστος του νερού ανά κυβικό μέτρο, μέτρηση που παρόλα αυτά δεν είναι έγκυρη καθώς όπως αναλύθηκε και παραπάνω ο υπολογισμός της απαιτεί τον συνυπολογισμό αρκετών ακόμα παραγόντων.

Στο δεύτερο υπολογιστικό φύλλο των αποτελεσμάτων του ROSA 9.1 καταγράφονται τυχόν παρατηρήσεις σχετικά με την λειτουργία των μεμβρανών, οι οποίες προκύπτουν βάσει δεικτών που αφορούν την διαλυτότητα του παραγόμενου νερού (Langelier Saturation Index, Stiff & Davis Stability Index, BaSO4 (% Saturation), CaF2 (% Saturation)). Στην συνέχεια υπολογίζονται αναλυτικότερα οι συνθήκες ροής του παραγόμενου και του νερού τροφοδοσίας, η αλατότητα, η ανάκτηση και η εφαρμοζόμενη πίεση ανά δοχείο πίεσης (εικόνα 5.26).

Design Warnings

-None-

Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0

Stiff & Davis Stability Index > 0

BaSO₄ (% Saturation) > 100%

CaF₂ (% Saturation) > 100%

Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

Stage Details

Stage	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.16	0.83	83.15	5.25	42598.36	60.43
	2	0.14	0.60	128.77	4.42	50525.50	60.30
	3	0.11	0.41	206.32	3.83	58429.68	60.20
	4	0.08	0.27	337.47	3.42	65404.20	60.11

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume any obligation or liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, customer is responsible for determining whether products are appropriate for customer's use. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

Εικόνα 5-26 Υπολογιστικό φύλλο 2 – ROSA 9.1

Πηγή : Sychem SA

Τέλος το λογισμικό της ROSA παράγει αποτελέσματα που σχετίζονται με την ποιότητα – σύσταση του συμπυκνώματος – αλμόλοιπου, έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν την συμπεριφορά των μεμβρανών ως προς την έμφραξη τους. Εξάγεται μάλιστα και μια προτεινόμενη παροχή χλωρίου στο νερό τροφοδοσίας έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία της μονάδας (εικόνα 5.27). Στην πραγματικότητα η παροχή χλωρίου στο ακατέργαστο νερό προκύπτει και από την εμπειρία του μελετητή – εγκαταστάτη μιας και τουλάχιστον για τα νερά της Μεσογείου και ειδικότερα της Ελλάδας η σύσταση του θαλασσινού νερού είναι σε ένα πολύ μεγάλο βαθμό πανομοιότυπη και κατά συνέπεια η εμπειρική χρήση χημικών εμπεριέχει ελάχιστο ρίσκο για μια μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση.

Scaling Calculations

	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	8.25	8.25	8.25
Langelier Saturation Index	1.33	1.33	1.76
Stiff & Davis Stability Index	0.31	0.31	0.57
Ionic Strength (Molal)	0.88	0.88	1.50
TDS (mg/l)	42552.93	42598.36	70894.84
HCO ₃	156.00	156.00	257.27
CO ₂	0.50	0.50	1.01
CO ₃	30.34	30.34	51.90
CaSO ₄ (% Saturation)	23.10	23.10	43.90
BaSO ₄ (% Saturation)	85.33	85.33	162.60
SrSO ₄ (% Saturation)	13.18	13.18	28.67
CaF ₂ (% Saturation)	74.44	74.44	343.03
SiO ₂ (% Saturation)	2.13	2.13	3.53
Mg(OH) ₂ (% Saturation)	1.60	1.60	2.69

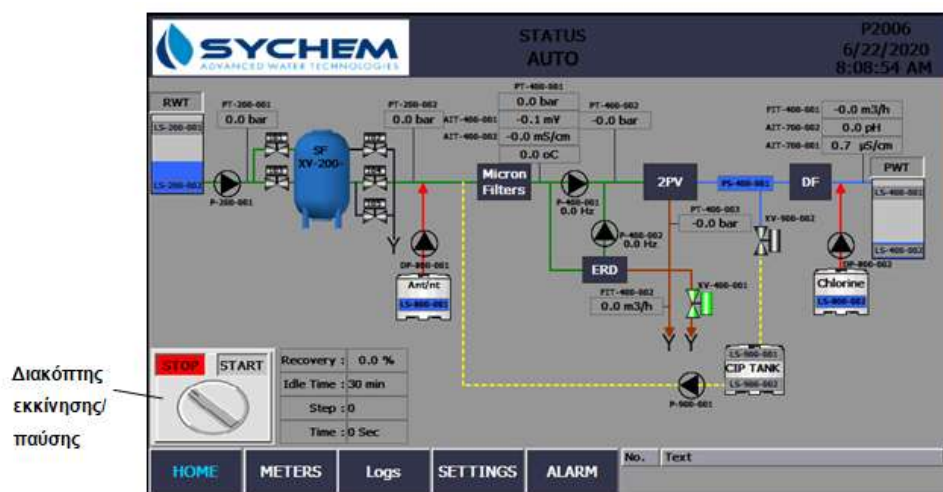
To balance: 45.43 mg/l Cl added to feed.

Εικόνα 5-27 Υπολογισμοί παραγόντων που επηρεάζουν την έμφραξη των μεμβρανών

Πηγή : Sychem SA

5.3 Εποπτική παρακολούθηση μονάδας

Για την παρακολούθηση αλλά και την παραμετροποίηση της μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στο Marbella Elix (και σε κάθε μονάδα αφαλάτωσης εγκατεστημένη από την εταιρεία Sychem A.E), έχει δημιουργηθεί και εγκατασταθεί πίνακας ελέγχου Siemens S7-1200 PLC (εικόνα 5.28). Αυτό είναι το περιβάλλον εργασίας και πλοήγησης του χρήστη αλλά και το περιβάλλον που ο εξειδικευμένος χειριστής θα παραμετροποιήσει την μονάδα, θα την ελέγχει και θα πραγματοποιεί μερικώς διαδικασίες καθαρισμού και συντήρησης.

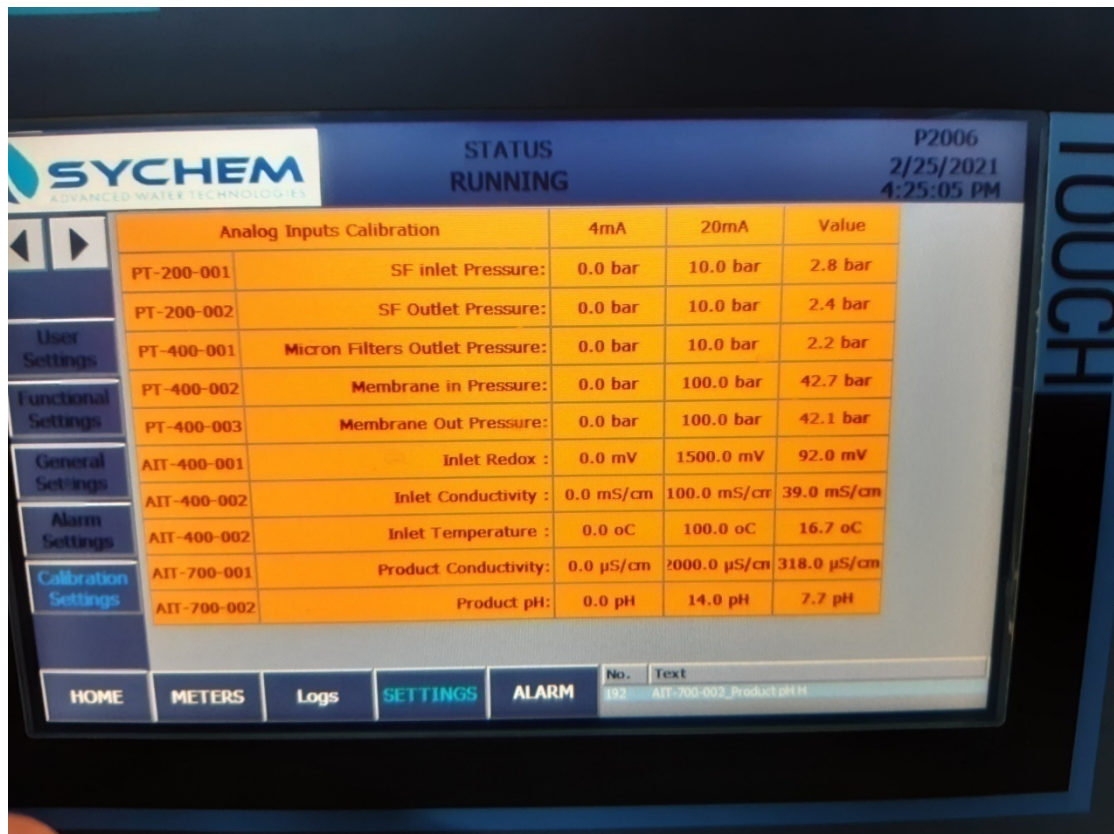


Εικόνα 5-28 Περιβάλλον εργασίας (HMI) μονάδας αφαλάτωσης

Πηγή : Sychem SA

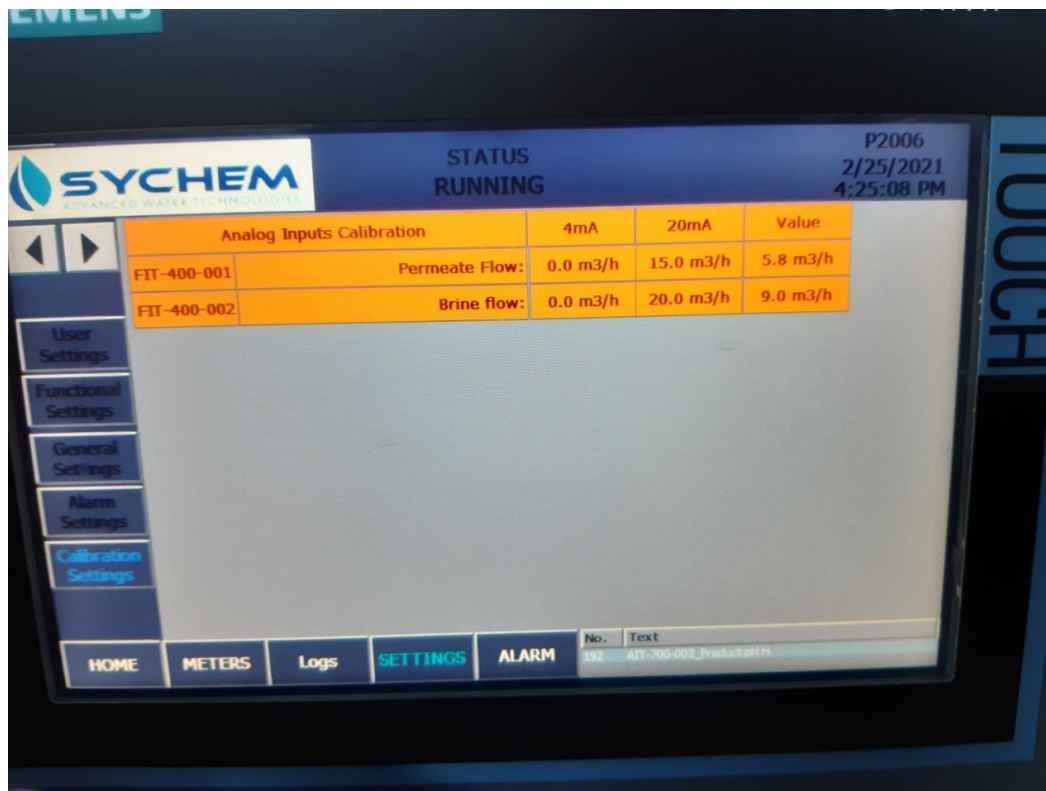
Η οθόνη HMI είναι εξοπλισμένη με 5 υπομενού: HOME, METERS, LOGS, SETTINGS & ALARMS, από όπου ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί ανά πάσα στιγμή τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας, να εξάγει δεδομένα και διαγράμματα, να τροποποιεί τις παραμέτρους λειτουργίας και να ελέγχει αν υπάρχουν σφάλματα ή προειδοποιήσεις. Επίσης υπάρχει και το μενού "Technician", στο οποίο παρέχεται πρόσβαση με αντίστοιχο κωδικό πρόσβασης και αφορά κυρίως την ρύθμιση βασικών παραμέτρων της μονάδας αφαλάτωσης.

Στην συνέχεια παραθέτονται ορισμένες εικόνες που δείχνουν την συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης, σε έναν συγκεκριμένο χρόνο (25/02/2021), με παραμέτρους όπως την διαφορική πίεση ανάμεσα στις μεμβράνες, την αγωγιμότητα του νερού τροφοδοσίας και του αφαλατωμένου νερού το pH του και τις ογκομετρικές παροχές του καθαρού νερού και του αλμολοίπου.



Εικόνα 5-29 Calibration Settings – Page 1

Πηγή : Sychem SA



Εικόνα 5-30 Calibration Settings – Page 2.

Πηγή : Sychem SA

Επίσης από το υπομενού General Settings ο χειριστής μπορεί να ορίσει την συχνότητα των διαφόρων εγκατεστημένων αντλιών αλλάζοντας έτσι τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας (εικόνα 5.31), ενώ από το υπομενού Alarm Settings ρυθμίζονται οι συνθήκες εκείνες που ενεργοποιούν τα διάφορα alarm της μονάδας (εικόνα 5.32).



Εικόνα 5-31 General Settings Menu

Πηγή : Sychem SA



Εικόνα 5-32 Alarm Settings Menu

Πηγή : Sychem SA

Κατά την εκκίνηση της μονάδας ανοίγουν οι βάνες του αμμόφιλτρου XV-200-101 & XV-200-104 ώστε το φίλτρο να τεθεί σε κατάσταση φίλτρανσης. Ανοίγει και η βάνα bypass του δικτύου απόρριψης (εάν είναι επιλεγμένη από τα settings) XV-400-001.

Κατά την εκκίνηση, και υπό την προϋπόθεσή ότι η μονάδα βρισκόταν σε κατάσταση αναμονής για μεγάλο χρονικό διάστημα, το αμμόφιλτρο τίθεται πρώτα σε κατάσταση ξεπλύματος όπου ανοίγουν οι βάνες XV-200-101 & XV-200-105 και στην συνέχεια εκκινεί η αντλία τροφοδοσίας προκειμένου να απομακρυνθεί το στάσιμο νερό. Το μέγιστο χρονικό διάστημα με την μονάδα σε κατάσταση αναμονής, ορίζεται από την παράμετρο "Filter Idle Timer for SU Rinse".

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία ξεπλύματος, στη συνέχεια το αμμόφιλτρο τίθεται σε κατάσταση φίλτρανσης όπου ανοίγουν οι βάνες XV-200-101 & XV-200-104, προκειμένου να συνεχιστεί η διαδικασία εκκίνησης της μονάδας αφαλάτωσης.

Η αντλία τροφοδοσίας τίθεται σε λειτουργία και ταυτόχρονα εκκινεί και η δοσομετρική αντλία του αντικαθαλωτικού. Η αντλία τροφοδοσίας θα παραμείνει σε λειτουργία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε να επιτευχθεί το ξέπλυμα και η εξαέρωση της συστοιχίας των μεμβρανών. Στην συνέχεια εκκινεί η αντλία κυκλοφορίας η οποία θα παραμείνει και αυτή με την σειρά της, σε λειτουργία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ώστε να ολοκληρωθεί η διαδικασία ξεπλύματος και εξαέρωσης των μεμβρανών.

Η αντλία υψηλής πίεσης θα εκκινήσει, μετά την πάροδο της απαιτούμενης χρονοκαθυστέρησης. Πριν την εκκίνηση της αντλίας υψηλής πίεσης ελέγχεται η πίεση στην αναρρόφηση της. Με την εκκίνηση της αντλίας υψηλής πίεσης, αυξάνει σταδιακά η πίεση και ξεκινάει η παραγωγή αφαλατωμένου νερού.

Στη συνέχεια, το σύστημα ελέγχει την στάθμη στο δοχείο Χημικού Καθαρισμού (CIP Tank) και ανοίγει η βάνα πλήρωσης του δοχείου χημικού καθαρισμού XV-900-002, εφόσον είναι απαραίτητο. Μόλις το δοχείο χημικού καθαρισμού γεμίσει, η βάνα πλήρωσης του δοχείου χημικού καθαρισμού (CIP tank Fill Valve) κλείνει και ενεργοποιείται η δοσομετρική αντλία χλωρίωσης DP-800-002.

Αντίθετα, κατά τη διαδικασία απενεργοποίησης της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, απενεργοποιείται η αντλία υψηλής πίεσης, καθώς και η αντλία δοσομέτρησης χλωρίου. Σε αυτό το στάδιο μειώνεται σταδιακά η πίεση στην είσοδο της συστοιχίας των μεμβρανών και επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του νερού υψηλής αγωγιμότητας.

Μετά την πάροδο της απαιτούμενης χρονοκαθυστέρησης, απενεργοποιείται η αντλία κυκλοφορίας και στην συνέχεια απενεργοποιείται και η αντλία τροφοδοσίας καθώς και η αντλία δοσομέτρησης αντικαθαλωτικού. Τέλος κλείνουν και οι βάνες εισόδου και εξόδου στο φίλτρο άμμου.

Μετά το πέρας της διαδικασίας παύσης της μονάδας αφαλάτωσης, λαμβάνει χώρα η διαδικασία ξεπλύματος των μεμβρανών με αφαλατωμένο νερό. Ανοίγει η βάνα πλήρωσης του δοχείου CIP και εκκινεί η αντλία CIP. Η αντλία θα παραμένει σε λειτουργία για συγκεκριμένο διάστημα. Με την διαδικασία ξεπλύματος, επιτυγχάνεται η περεταίρω απομάκρυνση του νερού υψηλής αγωγιμότητας από την

συστοιχία μεμβρανών. Μετά το πέρας της διαδικασίας ξεπλύματος οι μεμβράνες παραμένουν σε επαφή με νερό χαμηλής αγωγιμότητας και με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία επικαθίσεων αλάτων.

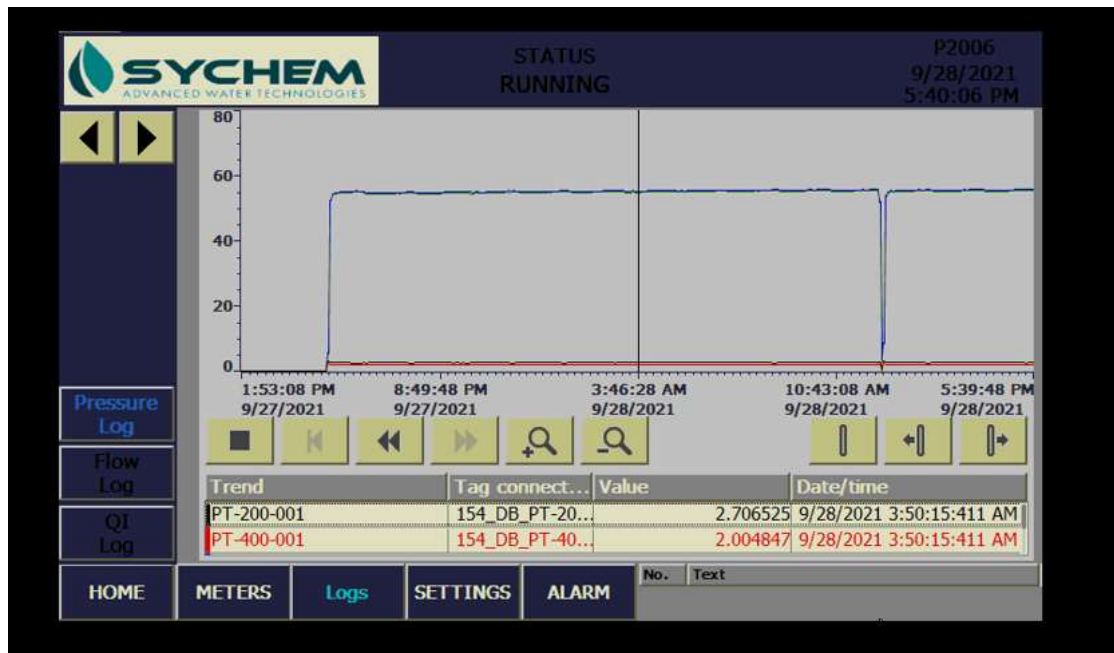
Όσον αφορά την παρακολούθηση του συστήματος, κατά την λειτουργία της μονάδας δίνεται προσοχή στα παρακάτω σημεία:

1. Καθημερινός οπτικός έλεγχος του συστήματος.
2. Καθημερινή καταγραφή των παραμέτρων λειτουργίας στα φύλλα καταγραφών.
 - Ενδείξεις πιέσεων
 - Ενδείξεις pH
 - Ενδείξεις Redox
 - Ένδειξη αγωγιμότητας

Είναι σημαντική η παρατήρηση απότομων μεταβολών σε παραμέτρους του συστήματος όπως είναι η πίεση, η παροχή, η ποιότητα του νερού, κτλ.

3. Έλεγχος των αντλιών και εξαέρωση όποτε κρίνεται απαραίτητο.
4. Έλεγχος της στάθμης στα δοχεία χημικών και πλήρωση των δοχείων με το κατάλληλο χημικό εφόσον απαιτείται.
5. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για το σύστημα δοσομετρησης αντικαθαλωτικού, καθώς η λειτουργία της μονάδας χωρίς την δοσομέτρηση αντικαθαλωτικού, μπορεί να προκαλέσει την έμφραξη των μεμβρανών.
6. Συνιστανται συχνοί έλεγχοι και ειδικά μετά τη προσθήκη χημικών, για πιθανή ανάγκη εξαέρωσης των δοσομετρικών αντλιών.
7. Ο ηλεκτρολογικός πίνακας πρέπει να παραμένει κλειστός καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα που εξάχθηκαν στις 28/09/2021 και αφορούν την μεταβολή της πίεσης με την πάροδο του χρόνου (εικόνα 5.33), την μεταβολή της ογκομετρικής παροχής του αφαλατωμένου νερού και του αλμόλοιπου με τον χρόνο (εικόνα 5.34) και την μεταβολή της αλατότητας με τον χρόνο (εικόνα 5.35). Στην πρώτη εικόνα παρατηρούμε μια απότομη πτώση της πίεσης πράγμα που μας υποδηλώνει ότι η μονάδα τέθηκε εκτός λειτουργίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε ηθελημένη παύση της είτε λόγω ότι μια από τις δεξαμενές ακατέργαστου ή παραγόμενου νερού προσέγγισε τα κρίσιμα όρια, όπως αυτά έχουν οριστεί, είτε λόγω κάποιας πιθανής βλάβης στην μονάδα ή ακόμα και για πραγματοποιηθεί κάποια από τις λειτουργίες συντήρησης. Στην τελευταία εικόνα που αφορά την μεταβολή της αλατότητας του παραγόμενου νερού σε σχέση με τον χρόνο παρατηρούμε μια μικρή αλλά σημαντική αύξηση της για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Η "ανωμαλία" αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η μονάδα μετά από μια σχετικά μεγάλη παύση παράγει νερό πιο πλούσιο σε αλατότητα μέχρι να προσεγγίσει τις μόνιμες βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.



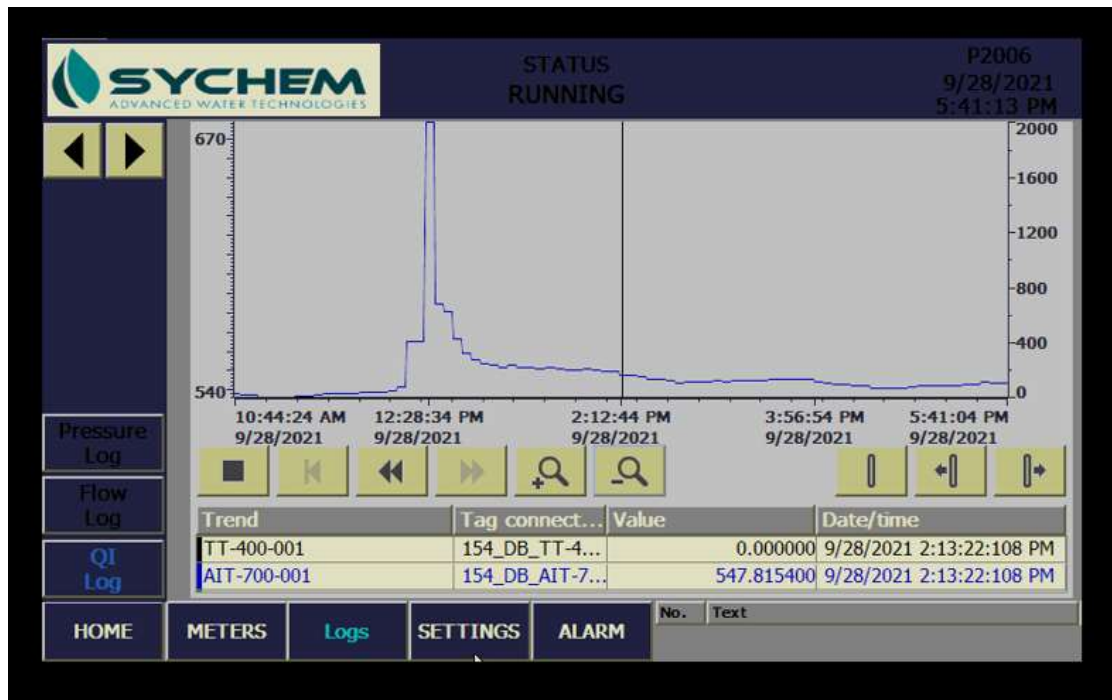
Εικόνα 5-33 Διάγραμμα μεταβολής της πίεσης με τον χρόνο

Πηγή : Sychem SA



Εικόνα 5-34 Διάγραμμα μεταβολής της ογκομετρικής παροχής αφαλατωμένου νερού και αλμόλοιπου με τον χρόνο

Πηγή : Sychem SA



Εικόνα 5-35 Διάγραμμα μεταβολής της αλατότητας του αφαλατωμένου νερού με τον χρόνο

Πηγή : Sychem SA

5.4 Διαδικασία συντήρησης

Κατά την διαδικασία της συντήρησης λαμβάνονται χώρα οι παρακάτω εργασίες:

Αντλίες

- Τα ρουλεμάν και τα στεγανά των αντλιών είναι ελεύθερα συντήρησης. Τα μοτέρ που δεν έχουν γρασαδόρους είναι επίσης ελεύθερα συντήρησης. Μοτέρ τα οποία είναι εξοπλισμένα με γρασαδόρους, πρέπει να γρασάρονται με γράσο υψηλής θερμοκρασίας με βάση το λίθιο

Αντλίες (APP)

- Οι αντλίες της Danfoss APP έχουν σχεδιαστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας και για χαμηλή συντήρηση. Απαιτούνται περιοδικές επιθεωρήσεις για να εξασφαλιστεί η φθορά των εξαρτημάτων (εάν υπάρχουν) ώστε να αντικατασταθούν εγκαίρως.

Ηλεκτροβάνες

- Οι ηλεκτροκινητήρες είναι ηλεκτρικοί και δεν απαιτείται συντήρηση. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα, μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα λόγω του μικρού όγκου και του βάρους του. Όλες οι προφυλάξεις ασφαλείας (π.χ. εργασία με ηλεκτρική ενέργεια) πρέπει να λαμβάνονται κατά την αντικατάσταση του ενεργοποιητή

Αναλυτικά όργανα

- Τα αναλυτικά όργανα, όπως τα αισθητήρια pH και αισθητήρια αγωγιμότητας πρέπει να καθαρίζονται και να βαθμονομούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η συχνότητα εξαρτάται από την ποιότητα του νερού, αλλά ως γενική σύσταση θα πρέπει να καθαρίζονται και να βαθμονομούνται 1-2 φορές το μήνα.

Σε περίπτωση βλάβης, το αισθητήριο μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί λόγω της μικρής ποσότητας και του μικρού βάρους του. Όλες οι προφυλάξεις ασφαλείας (π.χ. εργασία με ηλεκτρικό ρεύμα, εργασία με χημικά) πρέπει να λαμβάνονται κατά την αντικατάσταση του αισθητήρα.

Μεταδότες Πίεσης

- Οι μεταδότες πίεσης δεν χρειάζονται συντήρηση. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας του μεταδότη πίεσης, μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα λόγω του μικρού όγκου και του βάρους του. Κατά την αντικατάσταση του μεταδότη πίεσης πρέπει να λαμβάνονται όλες οι προφυλάξεις ασφαλείας (π.χ. εργασία με ηλεκτρικό ρεύμα).

Δοσομετρικές αντλίες

- Προκειμένου να εξασφαλιστεί μεγάλη διάρκεια ζωής και ακρίβεια δοσολογίας, φορώντας εξαρτήματα όπως τα διαφράγματα και οι βαλβίδες πρέπει οι δοσομετρικές αντλίες να ελέγχονται τακτικά για σημάδια φθοράς. Όπου είναι απαραίτητο, αντικαθιστούμε το φθαρμένο εξαρτήματα με γνήσια ανταλλακτικά της κατασκευάστριας εταιρίας.

Δοχεία χημικών

- Γίνεται έλεγχος των δοχείων χημικών για τυχόν διαρροές και εμφάνιση ιζήματος στο δοχείο. Σε περίπτωση που υπάρχει ίζημα, καθαρίζουμε το δοχείο και την ποδοβαλβίδα λαμβάνοντας τα απαραίτητα μέτρα προφύλαξης (γάντια μάσκα κλπ.)

Προγραμματισμός χημικού καθαρισμού (CIP)

- Στις μονάδες αντίστροφης ώσμωσης SWRO, ο χημικός καθαρισμός είναι απαραίτητος σε τακτά χρονικά διαστήματα και σε περίπτωση που η παροχή της παραγωγής μειωθεί κατά 10 % (έχοντας λάβει υπόψιν την επίδραση της θερμοκρασίας). Πρόσθετα έκτακτα μέτρα (συμπεριλαμβάνοντας το χημικό καθαρισμό) πρέπει να λαμβάνονται, αν η ποιότητα του αφαλατωμένου νερού επιδεινώνεται ή αν η διαφορά πίεσης εισόδου – εξόδου των μεμβρανών αυξάνεται. Η παρακολούθηση των βασικότερων και πιο σημαντικών παραμέτρων λειτουργίας είναι απαραίτητη για να βρεθούν και να καθοριστούν οι αιτίες που οδηγούν στο χημικό καθαρισμό. Οι σημαντικότερες των παραμέτρων είναι:
 - Έλεγχος δοσομέτρησης αντικαθαλατωτικού
 - Έλεγχος ποιότητας ακατέργαστου νερού (φυσικοχημική & μικροβιολογική ανάλυση)

Ο χημικός καθαρισμός των μεμβρανών προγραμματίζεται τακτικά, ανάλογα και με τις συνθήκες λειτουργίας. (τύπο CIP, διαδικασία και χρόνοι που

πρέπει να ακολουθηθούν, χημικό και ποσότητα που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε στάδιο όπως επίσης και τι παράμετροι πρέπει να ελέγχονται κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας (πίεση, χρόνος, pH, κτλ.)). Συνήθως, στο χημικό καθαρισμό εναλλάσσονται τουλάχιστον δύο διεργασίες: Η μία είναι καθαρισμός με όξινο χημικό και η δεύτερη με αλκαλικό χημικό. Η σειρά εναλλαγής των δύο διεργασιών μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις αιτίες που προκάλεσαν το καθαρισμό.

5.5 Παρατηρήσεις και πιθανές βελτιωτικές προτάσεις για την μονάδα αφαλάτωσης

Η μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία και είναι εγκατεστημένη στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix λειτουργεί το τελευταίο περίπου χρόνο χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και δυσλειτουργίες. Λόγω του σχετικά μικρού χρόνου λειτουργίας της δεν έχει κριθεί αναγκαίος ακόμη ο προγραμματισμός χημικού καθαρισμού, πράγμα που καταδεικνύει την ομαλή λειτουργία της. Στην πραγματικότητα πρόκειται για μια μικρή και απλή, από άποψη παραγωγικότητας, μονάδα και οι αποκλίσεις από τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας είναι σπάνιες και πολλές φορές αναμενόμενες, εύκολα αντιμετωπίσιμες και λογικές

Μια βελτιωτική ενέργεια που θα μπορούσε να γίνει για να καλυτερέψει το αφαλατωμένο νερό που φτάνει στο ξενοδοχείο αφορά την παρατήρηση που έγινε στην παράγραφο 5.6 σχετικά με την μικρή αύξηση της αλατότητας για μικρό χρονικό διάστημα μετά από σχετικά μεγάλη παύση της μονάδας (εικόνα 5.39). Παρόλο που αυτή η αύξηση της αλατότητας παραμένει στα όρια του επιτρεπτού για το πόσιμο νερό, θα μπορούσε να μην μεταφέρεται στην υδρευτική παροχή του ξενοδοχείου. Τοποθετώντας μια μικρή δεξαμενή πριν από αυτή του παραγόμενου νερού και μετρώντας την αλατότητα του μέσα της, θα ήταν εφικτό κάθε φορά που η μονάδα εκκινούσε μετά από μια σχετικά μεγάλη παύση και με την προϋπόθεση ότι παρατηρείται αυτή η μικρή αύξηση της αλατότητας, το νερό αυτό να απομακρύνεται με τον αλμόλοιπο έως ότου αποκατασταθεί ισορροπία στην σύνθεση του αφαλατωμένου νερού. Πρόκειται για ένα μέτρο βελτιστοποίησης το οποίο δεν απαιτεί μετρήσιμο μέγεθος επένδυσης και, αν και δεν είναι απαραίτητο, βελτιστοποιεί το τελικό προϊόν που φτάνει στον καταναλωτή. Μάλιστα πρόκειται για μέτρο το οποίο λαμβάνεται σε πολλές μονάδες αφαλάτωσης μεγαλύτερης δυναμικότητας.

Συμπεράσματα

Το πεδίο της αφαλάτωσης μέσω μεμβρανών RO έχει αναπτυχθεί ραγδαία τις τελευταίες 4 δεκαετίες και η διεργασία αυτή έχει επικρατήσει ανά τον κόσμο για μονάδες μικρής μεσαίας ακόμα και μεγάλης δυναμικότητας. Οι κατασκευαστές των μεμβρανών έχουν αναπτύξει προϊόντα τα οποία απευθύνονται σε κάθε συνθήκη και δυναμικότητα μειώνοντας το κόστος του αφαλατωμένου νερού ανά κυβικό μέτρο, αυξάνοντας την αξιοπιστία τους και την απόδοσή τους. Ειδικότερα για την περίπτωση την Ελληνικών υδάτων και πιο συγκεκριμένα όταν το νερό τροφοδοσίας είναι θαλασσινό τα δεδομένα είναι πανομοιότυπα όσων αφορά την χημική του σύσταση. Αυτός είναι και ο λόγος που για την περίπτωση της μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στην ξενοδοχειακή μονάδα Marbella Elix, οι συνθήκες λειτουργίας και απόδοσης της ήταν σε έναν βαθμό δεδομένες για τον μελετητή-εγκαταστάτη. Λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του ξενοδοχείου για ύδρευση σχεδιάστηκε μια μονάδα ανάλογης δυναμικότητας με συγκεκριμένα στάδια προκατεργασίας και μετα-επεξεργασίας, βάση της ποιότητας του νερού τροφοδοσίας.

Για την συγκριμένη μονάδα επιλέχθηκε ένας βαθμός ανάκτησης 40%, και προέκυψε το κόστος αφαλατωμένου νερού ανά κυβικό μέτρο περίπου στις 3kWh/m³. Λόγω της απλότητας, της ευελιξίας (εγκατάσταση σε αυτόνομο container) και της αξιοπιστίας τέτοιων μικρών μονάδων αφαλάτωσης RO, παρατηρείτε όλο και μεγαλύτερο επενδυτικό ενδιαφέρον από τους ξενοδοχειακούς ομίλους. Το ενδιαφέρον αυτόν οφείλεται αφενός στο ότι μια τέτοια μονάδα δεν αποτελεί μια πολύ μεγάλη χρηματική επένδυση και αφετέρου στο γεγονός ότι είναι μια λύση η οποία παρέχει ανεξαρτησία στο ξενοδοχείο και παράγει καθαρό νερό με σταθερή σύσταση που πολλές φορές είναι εμφανώς καθαρότερο από αυτό που παρέχεται από την αντίστοιχη υδρευτική εταιρεία της περιοχής.

Τέλος είναι πάρα πολύ σημαντικό το γεγονός ότι τις περιόδους πλήρους τουριστικής λειτουργίας, τα ξενοδοχεία που τροφοδοτούνται με νερό από μονάδες αφαλάτωσης σταματούν να ανησυχούν για τυχόν προβλήματα ή και αδυναμία παροχής νερού από την υδρευτική εταιρεία λόγω αυξημένης ζήτησης (φαινόμενο το οποίο παρατηρείται κατά κόρων στην Ελλάδα).

Όλα αυτά σε συνδυασμό με την εποπτική παρακολούθηση και συντήρηση που παρέχει η εταιρεία που εγκαθιστά την μονάδα αφαλάτωσης εξασφαλίζοντας την καλή λειτουργία της ανά τα έτη και δεδομένου ότι για τόσο μικρή δυναμικότητα το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της μονάδας λόγω της απόρριψης του αλμόλοιπου είναι πάρα πολύ μικρό, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι αυτόνομες μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση για ξενοδοχειακές μονάδες αποτελούν την επικρατέστερη λύση για την κάλυψη των αναγκών σε νερό ύδρευσης και θα αποτελέσουν την κυρίαρχη μέθοδο παροχής καθαρού νερού στα ξενοδοχεία συνδράμοντας σημαντικά στο μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα νησιωτικά και παράκτια διαμερίσματα της χώρας μας από την όλο και συνεχόμενη αύξηση του τουρισμού. Οι μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση στην νησιωτική και παράκτια περιοχή της Ελλάδας μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής των κατοίκων και των τουριστών τις περιόδους του καλοκαιριού, όπου παρατηρείται υπερσυγκέντρωση ανθρώπων σε περιοχές που δεν έχουν τις υποδομές για να τους

εξυπηρετήσουν, πρόβλημα πάγιο και αρκετά σημαντικό για την πιο βαριά βιομηχανία της χώρας μας.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία / Άρθρα δημοσιευμένα σε περιοδικό

- [1] «FilmTec Reverse Osmosis Membranes Technical Manual», DUPONT, 2020
- [2] García A.R., Martel N. M. ,Nuez I. , (2017), Short Review on Predicting Fouling in RO Desalination, NCBI, Membranes (Basel), 7 (4) .
- [3] Matin A., Laoui T., Falath W., Farooque M., (2021), Fouling control in reverse osmosis for water desalination & reuse : Current practices & emerginf environment – friendly technologies, Elsevier , Science of Total Environment , 3-10.
- [4] Fritzmann C., Lowenberg J., Wintegens T., Melin T.,(2006), State of the art of reverse osmosis desalination, Elsevier, Desalination 216, 8-20.
- [5] Sachit D. E., Veenstra J. N., (2017),Foulant Analysis of Three RO Membranes Used in Treating Simulated Brackish Water of the Iraqi Marshes, NCBI, Membranes (Basel), 7 (2).
- [6] Kagramanov G. G., Shibanov I.V., Blanko-Pedrekxon A. M., (2018), Development of hollow fiber reverse osmosis membranes and modules, ResearchGate, Journal of Physics Conference Series , 1099(1).
- [7] Zotallis K., Dialynas E., Mamassis N., Angelakis A., (2014), Desalination Technologies : Hellenic Experience, ResearchGate, Water 6(5).
- [8] Khayet M., (2016), Fouling and Scaling in Desalination, Elsevier, Desalination.
- [9] Amin M. Abdel-Fatah, Ayman El-Gendi, Fatma Ashour, (2016),Performance Evaluation and Design of RO Desalination Plant: Case Study, ResearchGate , Journal of Geoscience and Enviromental Protection , 4(2), 53-63.
- [10] Doran P.M., (2013), Mass Transfer Model, Elsevier , Standard Handbook Oil Spill Enviromental Forensics (Second Edition).
- [11] Avlonitis S. A., Kouroumbas K., Vlachakis N., (2003), Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants, Elsevier, Desalination, 151-158.
- [12] Wui S. A., Sangyoup L., Menachem E., (2006), Chemical and physical aspects of cleaning of organic-fouled reverse osmosis membranes, Elsevier, 198-210.

Αναφορά στο Διαδίκτυο

- [1] Καραλής Γιώργος, Εμμανουηλίδης Γιώργος, (2011) «Μονάδες αφαλάτωσης στα άνυδρα νησιά του Αιγαίου, Τεχνολογίες Θεσμικό πλαίσιο, χρήση ΑΠΕ και μελέτες περίπτωσης : Πάτμος, Λειψοί, Θηρασιά» [<https://docplayer.gr/968140-Energeiako-grafeio-ioy-aigaiou-monades-afalatoxis-sta-anydra-nisia-toy-aigaiou.html/ανακτήθηκε 20/07/2021>].

- [2] Τζεν Ε., (2010), Η Νομοθεσία για τις Μονάδες Αφαλάτωσης, Τμήμα Αιολικής Ενέργειας ΚΑΠΕ [http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/prodes_sep2010/tzen%20e_KAPE.pdf/ανακτήθηκε 10/05/2021].
- [3] Φουντουκίδης Γ. Ευάγγελος, Αφαλάτωση Νερού με Αντίστροφη Όσμωση, Τμήμα Φυσικής Χημείας και Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Πειραιά [http://ikaros.teipir.gr/phych/Talks/Reverse_Osmosisfountoukidis.pdf/ανακτήθηκε 01/06/2021].
- [4] Plant Intake Watereuse Association Desalination Committee, (2011), Overview of Desalination Alternatives, [https://watereuse.org/wp-content/uploads/2015/10/Intake_White_Paper.pdf/ανακτήθηκε 10/08/2021].

Διπλωματική, Πτυχιακή, Μεταπτυχιακή ή Διδακτορική Διατριβή:

- [1] Μιχαλόπουλο, Β. (2013), Θερμοδυναμική ανάλυση συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] Ράπτης Δ., (2012), Μελέτη αφαλάτωσης με μικρές μονάδες. Ειδικά με αυτόνομη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης και χρήσης ΑΠΕ, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [3] Υφαντής Ν., (2011) ,Σχεδιασμός και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη ώσμωση – Μελέτες περιπτώσεων, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [4] Νυδρέος Π., Σακουέλος, (2010), Μονάδες αφαλάτωσης στην Ελλάδα: Αποτύπωμα άνθρακα, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Χωροταξίας Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [5] Ευαγγελοπούλου Σ., (2013), Οικονομοτεχνική ανάλυση και αξιολόγηση συστήματος αφαλάτωσης από ΑΠΕ ,Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων, Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- [6] Ιμέρ Σ., (2019), Ανάλυση συστημάτων αφαλάτωσης και πλήρης σχεδιασμός μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου.
- [7] Γ. Κουμεντάκος (2018), Σχεδιασμός αφαλάτωσης με ηλιακό εξατμιστή πίπτοντος υγρού υμένα , Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ιστοσελίδες

- [1] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9D%CE%B5%CF%81%CF%8C>
- [2] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%86%CE%B1%CE%BB%CE%AC%CF%84%CF%89%CF%83%CE%B7>

- [3] <http://www.env-edu.gr/Chapters.aspx?id=106>
- [4] <https://www.desaldata.com>
- [5] <https://www.statistics.gr/el/home>
- [6] <https://energyrecovery.com/water>
- [7] <https://jacpump.wordpress.com/2011/04/17/solving-a-cavitation-problem/>
- [8] https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3679
- [9] <http://www.roplant.org>
- [10] <https://agriflifeextension.tamu.edu/library/water/desalination-methods-for-producing-drinking-water>
- [11] <https://www.dupont.com>